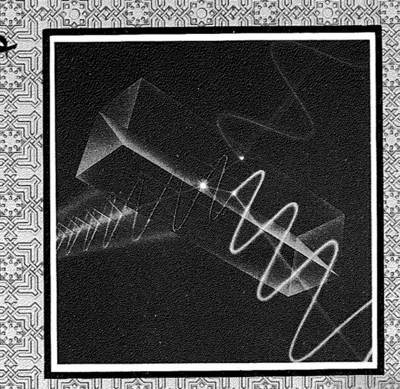


مؤسسة الكويت للتقدم العلمي
إدارة التأليف والترجمة والنشر



عجائب الضوء والمادة تجريبًا وتأويلا

ترجمة
الأستاذ الدكتور أدهم السمان



سلسلة الكتب المترجمة
الطبعة الأولى ١٩٩٧م



مؤسسة الكويت للتقدم العلمي
إدارة التأليف والترجمة والنشر

عجائب الضوء والمادة

تجريباً وتأويلاً

المترجم
أ. د. أدهم السمان
أستاذ الفيزياء بجامعة دمشق



سلسلة الكتب المترجمة
الطبعة الأولى ١٩٩٧

THE STRANGE THEORY
OF
LIGHT AND MATTER

المؤلف

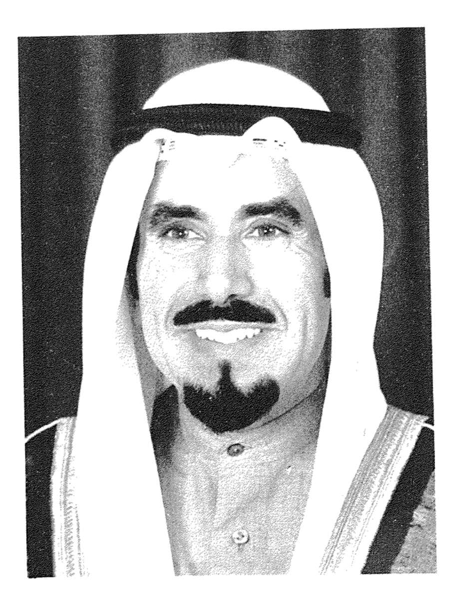
رتشـــارد فاينمـــان

حاز على جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٦٥

الناشر

Princeton University Press.

بسم الله الرحمن الرحيم



صاحب السمو الشيخ جابر الأحمد الجابر الصباح

أمير دولة الكويت



سمو الشيخ سعد العبدالله السالم الصباح

ولي العهد ورئيس مجلس الوزراء

المحتويات

قبل البداية

إن «محاضرات أليكس ماوتنر Alix Mautner Conferences» مخصصة لذكرى زوجتي أليكس، المتوفاة عام ١٩٨٢. كانت أليكس مختصة بالأدب الإنكليزي. لكن ذلك لم يمنعها من الاهتمام الجدي والمستمر بشتى ميادين العلم. ولهذا السبب بدا لي أن من الملائم إقامة مؤسسة تحمل اسمها وتهدف إلى تنظيم سلسلة محاضرات سنوية تعرض لجمهور المثقفين روح العلم ونتائجه.

وإنني لجد سعيد بأن يكون رتشارد فاينمان Feynman قد وافق على إلقاء أولى هذه المحاضرات. فصداقتنا ترجع إلى أيام الصبا السعيدة، منذ خمسة وخمسين عاماً، في فار روكاوي بولاية نيويورك. كان رتشارد وأليكس يعرف أحدهما الآخر منذ اثنين وعشرين عاماً. وكانت أليكس قد حاولت إقناع رتشارد بعرض فيزياء عالم الصغائر على جمهور من غير المختصين.

أخيراً أود أن أشكر جميع أولئك الذين أسهموا في «مؤسسة أليكس ماوتنر» والذي أتاحوا، بإسهامهم هذا، قيام هذه المحاضرات.

ليونارد ماوتنر

تقديم المؤلف والكتاب

لقد اشتهر رتشارد فاينمان ، في عالم الفيزيائيين ، بنظرته الخاصة إلى العالم الذي نعيش فيه . فمن خلال إعراضه عن إتخاذ موقف نهائي من أي شيء وتفضيله الاعتماد على أفكاره الخاصة به في كل مناسبة ، لا يندر أن يتوصل إلى فهم جديد وعميق للطبيعة ، فهم يتميز بالأناقة والبساطة في توصيف ما ينتج عنه .

وقد اشتهر أيضاً بالحماس الذي يُبديه في شرح الفيزياء للطلاب . إنه ، وهو الذي يرفض الدعوات لإلقاء محاضرات على الجمهور وفي أكثر المنظمات شهرة ، لا يضن بالوقت عندما يتعلق الأمر بمناقشات مع الطلاب الذين يقصدونه في مكتبه أو بالمبادرة إلى الحديث في نوادي الفيزياء في المدارس الثانوية .

إن هذا الكتاب يؤدي مهمة فريدة ـ فيما أعلم ـ مهمة أن يشرح بطريقة وافية شريفة ومباشرة واحدة من أصعب النظريات على الفهم لدى جمهور غير المختصين ، وهي نظرية الإلكتروديناميك الكمومي quantum electrodynamics . إنه يطمح إلى إعطاء القارىء المهتم فكرة عن نوعية الأسلوب الاستنتاجي الذي يعتمده الفيزيائيون لتفسير سلوك الطبيعة من خلال تعاملهم معها .

فإذا كنتَ من طلاب الفيزياء (أو تُعدُّ نفسك لدراستها) ، فلن تجد في هذا الكتاب شيئاً يحتاج إلى أن «تنساه» فيما بعد ، بل إنك ستجد فيه وصفاً كاملاً ودقيقاً ، حتى في أصغر تفاصيله ، للإطار النظري الذي يمكن أن تُدخل فيه مستقبلا ، وبدون تعديل ، أكثر المفاهيم تطوراً وعمقاً . أما أولئك الذين درسوا الفيزياء من قبل ، فسيجدون في هذا الكتاب «تصويراً» واضحاً لما كانوا بصدده فعلاً عندما كانوا منهمكين في حسابات شديدة التعقيد .

كان فاينمان في صباه قد أُعجب بجملة قرأها في حاشية أحد كتب الحساب تقول : «إن ما يستطيع أن يفعله أبله واحد ، يمكن أيضاً أن يفعله أي أبله آخر» . وأنا على يقين من أن فاينمان لن يستاء إذا قلنا لقرائه في تقديم هذا الكتاب : «إن ما يستطيع أن يفهمه أبله واحد ، يمكن أيضاً أن يفهمه أي أبله آخر» .

رالف لايتون

الفصل الأول

مقدمة

مقدمة

كانت أليكس ماوتنر شديدة الفضول تجاه أمور الفيزياء ، كانت تطرح عليّ أسئلة كثيرة ، وكنت أجيب عنها ، على ما يبدو ، بالأسلوب الذي أتبعه للإجابة عن أسئلة طلاب كاليفورنيا عندما يأتون إليّ أيام الخميس . وأدركت في النهاية أنني لم أنجح في إفهامها ما كنت أعدُّه أهم شيء في الفيزياء : الميكانيك الكمومي quantum mecanics .ففي كل مرة تناولنا فيها هذه النظرية ذات الأفكار الغريبة ، كان يحدث شيء من الاستعصاء . وانتهى بنا الأمر إلى أن اعترفت لها أن من المستحيل عليّ أن أشرح لها تلك الأفكار في ساعات معدودة ، ولو استغرقت سهرة كاملة ، وأن ذلك يتطلب مني وقتاً طويلاً ، ووعدتها أن أُعدّ في يوم ما محاضرات حول هذا الموضوع .

وقد أعددت فعلاً سلسلة محاضرات وذهبت أُجرِّبها على النيوزيلنديين ؛ فنيوزيلندا بعيدة ، والفشل هناك ليس ذا عواقب وخيمة . لكن النيوزيلنديين أكدوا لي أن كل شيء كان على ما يرام . فاستنتجت أن محاضراتي كانت حسنة الإعداد .. بالنسبة للجمهور النيوزيلندي على الأقل . وهكذا أصبحت جاهزة المحاضرات التي أعددتها وأنا أفكر بأليكس والتي لن تحضُرها مع الأسف .

إن موضوع حديثي اليوم معروف جيداً ، والواقع أن ما يُطلب مني عادة هو أن أتكلم عن آخر التطورات في محاولات للعثور على نظرية توحِّد قوى الطبيعة الأساسية الأربع ، ولم يعطني أحد فرصة الكلام عن الأشياء التي أعرفها جيداً. وهكذا يريد الناس أن يتعلموا مني أشياء لا أعرفها أنا نفسي ، وعلى هذا فلن أحاول أن أبهر نظركم بنظريات ما تزال قيد الدراسة ، ولم يمكن بعد تحليلها إلا بشكل جزئي . وأُفضل أن أتكلم اليوم في ميدان تم تحليله جيداً بشكل كامل ، إنه مجال من الفيزياء مازال يثير التعجب ، اسمه الإلكتروديناميك الكمومي .

وفي هذه المحاضرات أرى أن أشرح لكم بكل دقة ممكنة نظرية عجيبة ، نظرية تتعامل مع الضوء والمادة ، وخصوصاً مع التفاعل بين الضوء والمادة . وسأحتاج لوقت طويل كي أشرح لكم كل ما أنوي شرحه . ولما كان أمامنا أربع محاضرات ، فسوف أجد الوقت الكافي لأضع كل شيء في نصابه .

عُنيت الفيزياء عبر تاريخها بمحاولة الربط بين ظواهر أكثر فأكثر عدداً كي تستنبط من ذلك نظريات أقل فأقل عدداً ، وعلى هذا فقد انطلقت العملية من ظواهر

تختلف فيما بينها اختلاف كل من الحرارة الصوت والثقالة gravity فيما بينها . ثم جاء نيوتن الذي شرح قوانين الحركة ،فتبين أن بعض تلك الظواهر ، التي كانت تبدو متخالفة ،ليست في الواقع سوى وجوه شتى لشيء واحد ، هو الحركة . فقد أمكن ،مثلاً ،تفسير الصوت تماماً بالاستناد إلى حركة ذرات الهواء ، فلم يعد بالإمكان اعتبار الصوت ظاهرة تختلف عن الحركة ، واتضح أيضاً أن الظواهر الحرارية يمكن تفسيرها بسهولة انطلاقاً من قوانين الحركة . وهكذا تم انضمام مجالات كبيرة من الفيزياء في نظرية بسيطة ،لكن نظرية التثاقل gravitation(*) قد استعصى تفسيرها استناداً إلى قوانين الحركة ، ومازال حتى اليوم نظرية قائمة بذاتها . فالتثاقل سيظل ، ما لم يثبت عكس ذلك ، غير قابل للتفسير بالاعتماد على ظواهر سواه .

وبعد أن تم هذا الجمع بين الظواهر الحركية والصوتية والحرارية ، جاء اكتشاف عدد من الظواهر الأخرى ، هي الظواهر الكهربائية والمغنطيسية . وبصددها نجح جيمس كليرك مكسويل J.C. Maxwell ،عام ١٨٧٢ ، في أن يربط ضمن نظرية واحدة بين كل الظواهر الكهربائية والمغنطيسية مع الظواهر الضوئية . فالضوء ، في رأي مكسويل ،ليس سوى موجة كهرطيسية electromagnetic . وهكذا أصبحت الفيزياء ، عند هذه المرحلة من تطورها ، تحوي ثلاثة فصول هي : قوانين الحركة، وقوانين الكهرباء والمغنطيسية ، وقوانين الثقالة .

وفي حوالي عام ١٩٠٠ تم استنباط نظرية في بنية المادة اتخذت اسم النظرية الإلكترونية ، وتقول بأن الذرات تحوي جسيمات دقيقة جداً مشحونة بالكهرباء . ثم حدث تعديل تدريجي لهذه النظرية كي تأخذ بالحسبان وجود نواة ثقيلة في مركز الذرة تدور حولها إلكترونات خفيفة جداً.

وقد باءت بالفشل كل المحاولات التي جرت لتفسير حركة الإلكترونات حول النواة بالاعتماد على قوانين الميكانيك (وفق النموذج الذي اعتمده نيوتن في حركة الكواكب حول الشمس) . وقد اتفق ، في ذلك الوقت تقريباً ، أن جاءت نظرية النسبية التي مازال يقال بأنها أحدثت ثورة في الفيزياء . لكننا ، حين نقارنها باكتشاف عدم صلاحية قوانين نيوتن في تفسير الظواهر الذرية ، تبدو نظرية النسبية ذات مفعول متواضع . فالظواهر في السوية الذرية غريبة لدرجة أن استنباط منظومة نظرية تقوم مقام قوانين نيوتن استغرق وقتاً طويلاً وعملاً شاقاً . ولم يكن فهم ما

(*) إن الكلمتين ، ثقالة وتثاقل ، تعنيان في الواقع شيئا واحدا هو تجاذب الأشياء فيما بينها بسبب محتوياتها من المادة ، كانجذاب الأجسام نحو الأرض والتجاذب بين الشمس وكواكبها .(المترجم)

يحدث على مستوى الذرة إلا على حساب التخلي عن الأفكار المستمدة من الحس الشائع ، وقد وجب الإنتظار حتى عام ١٩٢٦ لتوطيد نظرية متكاملة غريبة جديدة على الفكر السائد ، تتيح تفسير السلوك العجيب للإلكترونات في أحشاء المادة . وعلى هذه النظرية المضطربة التي بدت ظاهريا فقط غير راسخة الأساس ، أطلق اسم النظرية الكمومية ، وهو اسم مشتق من كلمة «كم quantum» التي تترجم تماماً عن ذلك الوجه من الطبيعة الذي يناقض الحس الشائع . ذلك هو الوجه الذي سأحدثكم عنه .

وبسبب أن هذه النظرية الكمومية قد فسرت أيضاً الوقائع الكيميائية ، كاتحاد ذرتين من الهدروجين مع ذرة من الأكسجين لتشكيل جزيء من الماء ، فقد حلت محل كل النظريات التي كانت قبلها تحاول فهم الكيمياء . وبذلك أصبحت النظرية ، في هذه السوية العميقة ، فرعاً من فروع الفيزياء .

ومن نجاحها في تفسير الكيمياء تبوأت النظرية الكمومية فوريًا مكانة مرموقة . لكن مسألة التفاعل بين المادة والضوء ظلت على حالها . والواقع أن نظرية مكسويل في الكهرباء والمغنطيسية أصبحت بحاجة إلى تعديلات جذرية تهدف إلى التوفيق بينها وبين نظرية الكمّ ، وبذلك انبثقت ، في حوالي عام ١٩٢٩ ، النظرية الكمومية في التفاعل بين المادة والضوء ، تلك النظرية التي أُعطيت الاسم المرعب : الإلكتروديناميك الكمومي .

لكن هذه النظرية لم تعدم صعوبات اعترضت طريقها . والواقع أننا لو حسبنا بوساطتها مقدارًا ما بشكل إجمالي ، أي بتقريب أولي ، لحصلنا على نتيجة مقبولة تماماً . لكننا لو حاولنا ، انطلاقاً من ذلك ، إجراء حساب أدق لتبين لنا أن التصحيح الواجب إدخاله ـ الذي نتوقع منه أن يكون صغيراً جداً (كما هي الحال ، مثلاً ، عندما نضيف حداً آخر إلى سلسلة طويلة من الحدود متقاربة) ـ كبير جداً في الواقع ، بل لانهائي الكِبَر! وهذا معناه أن من المستحيل إجراء حسابات تتجاوز دقة معينة .

لنقل بهذه المناسبة إنني رويت لكم حتى الآن قصة ما أُسميه «قصة فيزياء الفيزيائيين» ، القصة التي يروونها فيما بينهم . . وهي مغلوطة على الدوام . إنها نوع من الأساطير اتفق عليه الفيزيائيون ، وراحوا يحكونه لطلابهم الذين يحكونه بدورهم لطلابهم ، وهكذا دواليك . وليس له بالضرورة علاقة وثيقة بتاريخ الفيزياء الحقيقي . . الذي أجهله طبعاً!.

وعلى كل حال، وبالعودة إلى «قصتي» هذه، استطاع ديراك Dirac أن يقيم، انطلاقاً من نظرية النسبية، نظرية نسبوية relativistic للإلكترون لم تأخذ في الحسبان الكامل كل النتائج الناجمة عن التفاعل بين الإلكترون والضوء. كان الإلكترون في نظرية ديراك يملك عزماً moment مغنطيسياً - وهذا يجعله شبيهاً بمغنطيس صغير - قيمته، كما تخرج من حسابات معقولة، تساوي 1. لكن نفراً من التجريبيين أثبتوا، عام ١٩٤٨، أن القيمة الحقيقية لذلك العزم المغنطيسي، لا تساوي 1، بل 1,00118 (بارتياب قدره 3 على الرقم الأخير). كان من المعروف والمؤكد أن الإلكترون والضوء يتفاعلان، فألقى ذلك ظلاً من الشك بأن القيمة التي حسبها ديراك ليست صحيحة تماماً، وكان يُعتقد أن بالإمكان تصحيحها بمساعدة الإلكتروديناميك الكمومي. وعلى هذا كانت المفاجأة كبيرة حين تبين بالحساب، في هذه النظرية الكمومية، أن العزم المغنطيسي للإلكترون لا يساوي 1,00118 بل قيمة لا نهائية الكبر!.

وفي عام ١٩٤٨ حللنا، جوليان شوينغر J. Schwinger وسين إيتيرو توماناغا S. I. Tomanaga وأنا، مسألة حساب الكميات الفيزيائية في الإلكتروديناميك الكمومي، وكان شوينغر أول من حسب العزم المغنيطيسي للإلكترون وفق هذه القواعد الجديدة. فوجد له القيمة 1,00116 القريبة من القيمة التجريبية قرباً أباح لنا الأمل في أننا كنا على الطريق الصحيح. وهكذا صار لدينا أخيراً نظرية كمومية في الكهرباء والمغنطيسية تتيح حساب المقادير الفيزيائية. وهي النظرية التي سأشرحها لكم.

إن لنظرية الإلكتروديناميك الكمومي اليوم من العمر أكثر من خمسين عاماً، وقد تم التحقق منها تجريبياً على نحو متزايد الدقة، في شتى الظروف التجريبية. وأستطيع الآن أن أوكد لكم بكل فخر عدم وجود فرق معنوي بين النظرية والتجربة!.

ولإعطائكم فكرة عن الدقة في هذه المطابقات التجريبية أكتفي بذكر بعض النتائج العددية الحديثة. لقد أعطت قياسات العزم المغنطيسي للإلكترون القيمة 1.001 159 65221 (بارتياب قيمته 4 على الرقم الأخير)؛ أما النظرية فتتنبأ بالقيمة 1. 001 159 65246 (بارتياب أكبر بخمس مرات تقريباً). ولكي تشعروا بمدى الدقة التي ينطوي عليها هذا الوفاق، أسوق لكم المقارنة التالية: إن هذه الدقة هي من رتبة الدقة في القيمة التي نحصل عليها لدى قياس المسافة بين لوس أنجلوس ونيويورك

بإرتياب لا يزيد عن ثخن شعرة واحدة، وهذا يعطيكم فكرة عن درجة الدقة التي توصلنا إليها في خلال السنين الخمسين الماضية، سواء على صعيد التجربة أو النظرية. ولنذكر في هذا السياق أنني لم أتعرض حتى الآن إلا لقيمة عددية واحدة، لكن هناك مقادير فيزيائية أخرى يمكن حسابها بفضل الإلكتروديناميك الكمومي وقياسها بدقة. والشواهد التجريبية تتناول أبعاداً تذهب من مئة ضعف من حجم الأرض إلى عشير حجم نواة الذرة. وأنا لم أذكر هذه الأرقام إلا لكي أذهلكم وأجعلكم تشعرون بأن هذه النظرية قريبة من الهدف؛ وسأشرح لكم، في هذه المحاضرات، كيف تجري هذه الحسابات.

لكنني أحب قبل ذلك أن أذهلكم أكثر قليلا، وذلك بأن أريكم اتساع مجال الظواهر التي يتيح الإلكتروديناميك الكمومي تفسيرها. والواقع أن من الأسهل أن نبدأ من النهاية فنقول إن هذه النظرية تتيح توصيف كل ظواهر العالم الفيزيائي، باستثناء المفعولات الثقالية (تلك التي تمسك بكم جالسين على كراسيكم ـ وبتعبير أصح: إن ما يمسك بكم جالسين على كراسيكم مزيج من الثقالة والمجاملة) وظواهر النشاط الإشعاعي (التي تخص مرور نواة الذرة من سوية طاقية إلى سوية أخرى، وبتعبير أشمل: الفيزياء النووية). فإذا استثنينا الثقالة والفيزياء النووية، ماذا يبقى؟ يبقى أمامنا ظواهر كاحتراق البنزين في محركات السيارات وتشكل الفقاعات والزَّبد، وقساوة الملح أو الفولاذ.. حتى أن البيولوجيين (علماء الحياة) يحاولون اليوم أن يفسروا، ما أمكنهم، الحياة بالاعتماد على الكيمياء، وقد ذكرت سلفاً أن أساس الكيمياء هو الإلكتروديناميك الكمومي.

وعلي هنا أن أوضح النقطة التالية: عندما أقول إن الإلكتروديناميك الكمومي يفسر كل ظواهر دنيا الفيزياء، فإن ذلك ليس صحيحاً تماماً. فمعظم الظواهر الشائعة حولنا تعتمد على عدد هائل من الإلكترونات، وأذهاننا تجد صعوبة في استيعاب مثل هذا التعقيد. لكننا نستطيع، في مواجهة مثل هذه الظروف، استخدام النظرية لصنع فكرة عما لا بد أن يحدث إجمالياً وللتحقق من أنه قد حدث بالفعل إجمالياً. ومن جهة أخرى، إذا نفذنا تجربة مخبرية تتناول عدداً صغيراً من الإلكترونات، في ظروف تجريبية بسيطة، وإذا حسبنا، بدقة هذه المرة، ما يجب أن يحدث، ثم قسنا، بدقة أيضاً، ما حدث، عندئذ يتضح لنا، مهما كانت التجربة، أن الإلكتروديناميك الكمومي يعمل على ما يرام.

ونحن، الفيزيائيين، نقف على الدوام بالمرصاد لكل ما يمكن أن يظهر من خلل في النظرية. إنها قاعدة اللعبة: إن الجانب المثير في النظرية هو ما يمكن أن يظهر فيها من خلل. أما فيما يخص الإلكتروديناميك الكمومي فلم نجد فيه أي خلل حتى الآن. إنه، بمعنى ما، لؤلؤة الفيزياء النظرية التي نتباهى بها أكثر من أي شيء آخر.

والإلكتروديناميك الكمومي يُتخذ أيضاً نموذجاً للنظريات الجديدة التي تسعى لتفسير الظواهر النووية، أي تلك التي تحدث ضمن نواة الذرة. فإذا اعتبرنا العالم الفيزيائي مسرحاً للتمثيل نقول إن الممثلين هم الإلكترونات، خارج النواة، والكواركات quarks والغليونات gluons.. الخ ـ عشرات الجسيمات الأخرى ـ ضمن النواة ـ على الرغم من أن هؤلاء الممثلين جميعاً ذوو مظاهر متخالفة جداً، فإن بينهم في «لعبهم» قرابة في الأسلوب واضحة جداً، مما يمكن تسميته بالأسلوب الكمومي، وهو أسلوب عجيب، بكل معنى الكلمة، ومحدد السمات جداً. وسأذكر لكم في المحاضرة الأخيرة، بضعة أمور عن الجسيمات النووية، أما في الوقت الحاضر فاكتفي، بغية المزيد من التبسيط، بالكلام عن الفوتونات ـ وهي جسيمات الضوء ـ وعن الإلكترونات، لأن المهم، بهذا الصدد، هو أسلوب سلوك هذه الجسيمات، ذلك هو بيت القصيد.

ها أنتم إذن قد عرفتم الآن ما سأتحدث عنه. وهنا يخطر بالبال السؤال التالي: هل ستفهمون ما سأقوله لكم؟ ذلك أن من يأتي ليستمع إلى محاضرة علمية يعتريه الشك في إمكانية فهمه لما سيقال فيها، لكنه يأمل أن يرى محاضراً ذا ربطة عنق جميلة مثلاً، أو لطيف المنظر (فاينمان لا يضع بالطبع ربطة عنق).

إن ما سأرويه لكم ليس سوى ما أُعلمه للطلاب الذين يحضّرون أُطروحة في الفيزياء. فهل تعتقدون حقا أنني أستطيع أن أشرح لكم كل ذلك بما يتيح لكم فهمه؟ الجواب، بكلام الجد هو كلا: من المؤكد أنكم لن تفهموا. ولكنكم ستقولون لي: لماذا إذن كل هذا العناء الذي سنتجشمه؟ ولماذا تقضي كل هذا الوقت أمامنا، إذا كنا لن نفهم شيئًا مما ستقوله؟.

الحق أنني وضعت نصب عيني أن أستطيع استبقاءكم هنا للأصغاء إليّ. لأن الطلاب، ولا أخفي عنكم شيئاً، لا يفهمون، هم أيضاً، في هذا الأمر شيئاً. لماذا؟ الجواب، بكل بساطة، هو لأنني، أنا بالذات، لا أفهم من هذا الأمر شيئاً ولا أحد فوق ذلك يفهم منه شيئاً.

أُحب، بهذا الصدد، أن أقول شيئاً عما أقصده بكلمة «فهم». إن عدم فهم

محاضرة ما يعود إلى أسباب كثيرة منها ،مثلاً ، أن المحاضر قد لا يحسن التعبير ـ لا ينجح في التعبير عما يريد قوله ، أو يقول عكس ما يريد ، فيجد السامع صعوبة في الفهم ، وهذا محذور شائع . أما أنا فسأبذل كل ما بوسعي كي لا تزعجكم لكنتي النيويوركية .

وهناك سبب شائع آخر : إن المحاضر ، لا سيما إذا كان فيزيائياً ،يستخدم كلمات من اللغة الدارجة في معانٍ غير مألوفة . والواضح أن الفيزيائيين يستخدمون غالباً كلمات من اللغة الدارجة ـ «عمل Work» «فعل action» «طاقة energy» ، وحتى كلمة «ضوء light» كما سنرى ـ في معنى تقني . فعندما أستعمل كلمة «عمل» في الفيزياء ، لا اقصد بها معناها بالضبط في لغة الحياة اليومية . وقد يحدث لي ، في هذه المحاضرات ، أن استخدم كلمة من اللغة الدارجة دون أن أشعر أنني أقصد بها معنى خاصاً . ولئن كنت سأبذل كل جهدي لتحاشي هذه الأمور (وهذه ، على أية حال مهنتي) إلا أن هذا النوع من الخطأ يصعب تحاشيه .

هذا وقد يحدث أن لا تفهموا ما سأقوله لكم عن طريقة عمل الطبيعة ، وسبب ذلك أنكم لا تدركون لماذا تعمل بتلك الطريقة ، ولكن يجب أن تعلموا أن ما من أحد يستطيع أن يعلل لماذا تتصرف الطبيعة بذلك الشكل ، لا بشكل آخر .

ومن الأسباب التي تعوق «الفهم» أذكر أخيراً أنني سأقول لكم شيئاً لن تستطيعوا ، بكل بساطة ، أن تصدّقوه ، شيئاً سترفضونه ولن تحبوه . عندئذ تتشكل غشاوة تجعلكم تتوقفون عن الإصغاء . سوف أصف لكم الطبيعة ؛ وإذا لم يعجبكم ذلك فستجدون صعوبة في فهمه . إنها مسألة كثيراً ما صادفها الفيزيائيون . ولكثرة ورودها اقتنعوا في النهاية بأن قضية الإعجاب بها أو عدمه ليست بذات شأن . لكن المهم أن تتيح النظرية المطروحة نبوءات تتفق مع التجربة . فليس المطلوب من النظرية أن تكون مستساغة على صعيد الفلسفة ، أو أن تكون سهلة على الفهم ، أو أن تكون مقبولة لدى الحس الشائع . ونظرية الإلكتروديناميك الكمومي تقدم للطبيعة صورة غير معقولة على صعيد المفهوم السائد لكنها تتفق تماماً مع التجربة . وعلى هذا آمل أن تقبلوا الطبيعة كما هي : شيئاً غير معقول .

أما أنا فأمارس تسلية في الالتزام بأن أشرح لكم «لا معقولات» الطبيعة ، لأنني أجد في ذلك متعة كبيرة . أما أنتم فأرجو منكم أن تصموا أسماعكم بحجة أنكم لا تستطيعون أن تصدقوا أن الطبيعة يمكن أن تنطوي على كل هذه الغرائب . اصغوا لي

إلى النهاية : وأملي كبير في أن تشعروا ، بعد انتهاء هذه المحاضرات ، بنفس المتعة التي أشعر بها .

كيف أتدبر أمري كي أشرح لكم ما لا أشرحه للطلاب إلا بعد أن يقضوا أربع سنوات في دراسة الفيزياء؟ سأجيب عن هذا السؤال مستعيناً بالتشبيه التالي . كان هنود المايا يولون اهتماماً كبيرا لشروق وغروب كوكب الزُهرة الذي كانوا يسمونه «نجمة الصبح» تارة و«نجمة المساء» تارة أخرى ؛ كان ما يهمهم من الزهرة أن يعرفوا موعد ظهورها في السماء . وبعد رصدها عدة سنوات توصلوا إلى ملاحظة أن ست دورات زُهرية تعادل تقريبا ثماني «سنين اسمية» ذات ٣٦٥ يوماً (كان حكماء المايا يعرفون أن سنتهم الاسمية لا تساوي بالضبط السنة الحقيقية ذات الفصول ، حتى أنهم حسبوا الفرق بينهما) . ولإجراء الحسابات اخترعوا تركيباً من قضبان ونقاط تمثل الأعداد (بما فيها الصفر) ؛ كانوا قد وجدوا منظومة قواعد تتيح لهم التنبؤ بالحساب ، لا بمواعيد شروق الزهرة وغروبها فحسب ، بل وبظواهر سماوية أخرى ، كخسوفات القمر .

في ذلك العصر كان نفر قليل من كهان المايا قادرين على إجراء حسابات على تلك الدرجة من التعقيد . تخيلوا أننا طلبنا من أحد هؤلاء الكهان أن يشرح لنا كيف يجب أن نعمل كي نحسب الموعد القادم لظهور الزهرة كنجمة صبح . ولنفترض أيضاً أننا لم نذهب قط إلى المدرسة وأننا نجهل عملية الطرح . فكيف يتدبر الكاهن أمره ليشرح لنا كيف نقوم بهذه العملية؟ .

إنه يستطيع حتماً أن يُعلِّمنا كيف تتشكل الأعداد مستعيناً بالقبضان والنقاط ، ثم القواعد الخاصة بالطرح . لكنه يستطيع أيضاً أن يشرح لنا معناها فيقول : «إذا كنتم تريدون طرح ٢٣٦ من ٥٨٤ فخذوا ٥٨٤ حبة فاصولياء وضعوها في وعاء ؛ ثم أخرجوا من الوعاء ٢٣٦ حبة وضعوها جانباً .عُدوا بعدئذ الحبات التي بقيت في الوعاء . عندئذ تجدون نتيجة طرح ٢٣٦ من ٥٨٤» .

عندئذ يمكن أن تعترضوا قائلين : يا لها من عملية! نعدُّ حبات الفاصولياء ، ثم نعدُّ حبات أخرى ونضعها جانبا ، ثم نعدُّ . . . ، يا ويلي من الضجر!» .

ويجيب الكاهن :«لهذا السبب بالضبط اخترعنا جملة قواعد تعمل بالقضبان والنقاط» . قد تبدو لكم هذه القواعد مصطنعة ؛لكنها «حِيلَ» تتيح الحصول على النتيجة بشكل أكثر فعالية من عد حبات الفاصولياء . فالمهم هو أننا نحصل على

النتيجة ذاتها بالطريقتين ؛ فنحن نستطيع ، كي نتنبأ بمواعيد الزهرة ، أن نعدّ الحبات (هي عملية طويلة ومملة ، لكنها سهلة على الفهم) أو أن نطبق القواعد ، «الحيل» (وهي عملية أسرع بكثير ، لكنها تستدعي أن نكون قد أمضينا عدة سنوات على مقاعد المدرسة) .

وبموجز القول ، مادمنا غير مجبرين على أن نعمل فعلاً عملية الطرح ، يمكن أن نكتفي بفهم كيفية إجرائها ، وليس في هذا صعوبة تذكر . وأنا سأنسج على هذا المنوال : سأشرح لكم ما يعمله الفيزيائيون فعلاً كي يتنبؤوا بسلوك الطبيعة ؛ لكنني لن أعلمكم كل القواعد «الحيل» التي تتيح لكم أن تفعلوا مثل كل ما يفعلون . فلكي تتوصلوا إلى نبوءات معقولة في ميدان الإلكتروديناميك الكمومي يجب عليكم ، كما سترون ، أن ترسموا حشداً من الأسهم الصغيرة . ويحتاج الطلاب إلى سبع سنوات جامعية كي يتعلموا اللعب بهذه الأسهم الصغيرة بشكل مُجد .

أما نحن فسنقفز فوق هذه السنوات السبع الجامعية دفعة واحدة . وآمل أن أجعلكم قادرين ، بعد أن أشرح لكم مباشرة الالكتروديناميك الكمومي وأن أفصّل لكم ما نعمله فعلاً ، على فهم هذه النظرية بأحسن مما يفهم معظم الطلاب! .

لنعد إلى مثال المايا . نستطيع أن نسأل الكاهن : لماذا تساوي خمسُ دورات زهرية قرابة ٢٩٢٠ يوماً ، أي ثماني سنوات؟ إنه يستطيع أن يسرد لنا كوم نظريات تشرح لنا لماذا كان ذلك ، كأن يقول : «إن ٢٠ عدد مهم في نظامنا العددي ؛ وإذا قسمنا ٢٩٢٠ على ٢٠ نجد ١٤٦ ، والعدد ١٤٦ يتلو مباشرة عدداً آخر يمكن أن نتمثله بطريقتين مختلفتين كمجموع مربعي عددين . .» . لكن الواقع أن هذه النظرية لا علاقة لها بالزهرة . ونحن نعلم اليوم أن نظريات من هذا القبيل لا تقود إلى أي شيء . ومرة أخرى لن نهتم بالنظريات التي تشرح لماذا تتصرف الطبيعة كما تتصرف ؛ ولا يوجد نظرية جيدة من هذا القبيل .

إن كل ما فعلته حتى الآن هو أنني وضعتكم في جو نفساني يشجعكم على الإصغاء إلي ؛ وهذا ضروري جداً لنجاح مهمتي . حسناً ، والآن هيا بنا؟ .

سنبدأ بالضوء . إن أول شيء اكتشفه نيوتن ، عندما بدأ يهتم بالضوء ، هو أن الضوء الأبيض مزيج من عدة ألوان . وبوساطة موشور زجاجي حلل الضوء الأبيض إلى ألوان شتى ؛ ثم فصل حزمة من لون معين - ولنقل الأحمر ، مثلاً - أسقطها على موشور آخر ، فرأى أن هذا اللون لم يمكن تحليله إلى مجموعة ألوان أخرى ، بل بقي أحمر . فاستنتج أن الضوء الأبيض مزيج من ألوان مختلفة كل منها لون صاف ، أي غير قابل للتحليل .

(الواقع أن الضوء ذا اللون الصافي يمكن أيضًا تجزئته ، لكن بطريقة مختلفة ، إلى ضوئين من اللون نفسه ، يقال إنهما «مستقطبان Polarized» بشكلين مختلفين . لكن هذا الجانب من الضوء غير جوهري لفهم الإلكترودīناميك الكمومي ؛ ولن أهتم به ، ولو كان ذلك يجعل شرح النظرية ناقصاً بعض الشيء . ولن يؤثر هذا التبسيط على تفهم ما سأقوله لكم . لكنني حريص على أن أذكر ما أهمله في كل مرحلة) .

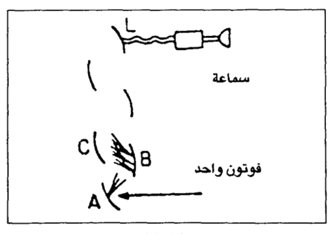
عندما أتكلم عن «الضوء» فإن كلامي لا يقتصر على الضوء المرئي فحسب ، المتدرج من الأحمر إلى الأزرق . ذلك أن الضوء الذي نراه ليس سوى جزء صغير من طيف واسع جداً ، على غرار ما نعلم من أن سُلَّم (طيف) الأصوات يمتد خارج السلّم الموسيقي من طرفيه كليهما . وكل «نغمة» من «سلّم الأنغام الضوئية» تتعين بعدد خاص بها اسمه التواتر Frequency (يسميه بعضهم تردداً ، والمذيعون ذبذبة) . ومع تزايد التواتر يتغير لون الضوء المرئي من الأحمر إلى البرتقالي فالأصفر فالأخضر فالأزرق فالبنفسجي ، ثم إلى ما نسميه فوق البنفسجي وهو ضوء لا نراه ، لكنه يؤثر في بعض أفلام التصوير ؛ فهو أيضا ضوء ذو تواتر أعلى من أن تتحسس به العين البشرية .(لنطأطىء إذاً من غلوائنا : فما نستطيع ان نكشفه بحواسنا ، بعيوننا ، ليس سوى جزء من هذا العالم!) وإذا تزايد التواتر إلى أكثر من ذلك ندخل في مجال الأشعة السينية X-rays ، ثم أشعة غاما gamma ، إلخ . وإذا تناقص التواتر ، بدءاً من الأحمر ، ندخل في مجال ما نسميه تحت الأحمر (أمواج الحرارة ، وهي ضوء لا نراه أيضًا ، لكنه يؤثر في الأفلام الحساسة) ، ثم أمواج التلفزيون والراديو . وهذا كله عندي «ضوء» . لكنني ، في معظم الأمثلة التي أسوقها ، سأستخدم ضوءاً أحمر صافياً ، ويجب أن لا تنسوا أن الإلكترودیناميك الكمومي نظرية تنطبق على الطيف الضوئي كله ، وتحكم كل ما يحدث في أعماق تلك الظواهر .

كان نيوتن يعتقد ان الضوء مصنوع من جسيمات ، وكان مصيباً (رغم أن المحاكمات الفكرية التي قادته إلى هذه النتيجة كانت خاطئة) . ونحن اليوم على يقين من أن الضوء مصنوع من جسيمات ، لأننا نملك أجهزة حساسة جداً تُصدر «تكة» كلما اخترقها شعاع ضوئي ، حتى ولو كانت شدته ضعيفة جداً :فالتكات هي هي ، لكن عددها يتناقص : فالضوء يشبه إذن قطرات المطر (وقطرات الضوء تسمى «فوتونات») ولقطرات كل لون معين من الضوء الصافي وحيد اللون «مقاسات» متساوية .

الواقع أن العين البشرية حساسة جدًا : إذ تكفي خمسة فوتونات أو ستة لتهييج

خلية عصبية من شبكتيها كي ترسل إشارة كهربائية إلى الدماغ . ولو كانت عملية التطور الحيوي قد استمرت إلى أبعد من ذلك ، بحيث تجعل العين ذات حساسية أكبر بعشر مرات ، لما احتجنا لهذه المناقشة ، لأننا كنا سنشعر بالضوء الصافي الضعيف جداً، وذلك بشكل سلسلة ومضات قصيرة متقطعة وذات شدة واحدة .

قد تتساءلون عن كيفية كشف فوتون واحد . إن أحد الأجهزة المستخدمة لهذا الغرض يسمى المضاعف الفوتوني photomultiplier ؛ وسأشرحه لكم باختصار . عندما يسقط فوتون على صفيحة معدنية A (القسم السفلي من الشكل ١) ، فإنه يكسر الرابطة (الضعيفة) التي تمسك بأحد الكترونات ذرة من المعدن : ينجذب بعدئذ هذا الإلكترون إلى الصفيحة B (وهي تحمل شحنة كهربائية موجبة) ، ويكون الاصطدام بها عنيفاً بما يكفي لاقتلاع ثلاثة إلكترونات منها أو أربعة . ثم ينجذب كل واحد من هذه الإلكتروتات بالصفيحة الثالثة C (التي تحمل شحنة موجبة أيضًا) ويحرر إلكترونات أخرى ، وهكذا دواليك يتضاعف عدد الإلكترونات المتحررة من صفيحة إلى أخرى حتى يبلغ المليارات بعد عشر صفائح أو اثنتي عشرة ، فيسقط بهذه الصورة على الصفيحة الأخيرة تيار كهربائي يمكن كشفه بسهولة ؛ إذ يمكن تضخيمه وإرساله إلى سماعة فيحدث «تكة» مسموعة . وهكذا ، من أجل كل فوتون وارد على المضاعف الفوتوني تصدر «تكة» ذات شدة معينة .



شكل (١)

المضاعف الفوتوني . يتيح هذا الجهاز كشف الفوتونات فرداً فرداً ، الفوتون الوارد على الصفيحة A يقتلع إلكترونات تجذبها الصفيحة B ، التي تحمل شحنات كهربائية موجبة ، فيقتلع منها إلكترونات أخرى تجذبها الصفيحة C المشحونة إيجابياً أيضاً . وهكذا دواليك تتوالى هذه العمليات ، صفيحة بعد أخرى ، حتى يبلغ عدد الإلكترونات مليارات تضرب الصفيحة الأخيرة L فتولّد تياراً كهربائياً يقوم بتضخيمه تركيب كهربائي معروف . وهذا المضخّم موصول بسماعة عادية تُصدر «تكة» صوتية تنبىء عن الفوتون الأولي . لا تختلف شدة «التكة» من فوتون وارد لآخر .

فإذا أحطنا ، بعدة مضاعفات فوتونية ومن كل الجهات ، منبعاً ضوئياً ضعيفاً يرسل ضوءاً في كل الاتجاهات ، فيسقط الضوء على أي من هذه المضاعفات مسببا في كل مرة «تكة» ذات شدة واحدة . إن هذا التركيب يتصرف بطريقة «شيء أو لا شيء» ؛ أو بتعبير آخر : إذا صدرت عن أحد المضاعفات الفوتونية «تكة» في لحظة ما، فإن المضاعفات الأخرى تكون صامتة تماماً في تلك اللحظة بالذات (إلا إذا اتفق أن صدر عن المنبع فوتونان معاً ،لكن هذا نادر جداً) . فالضوء لا يمكن تقسيمه إلى «أنصاف جسميات» يذهب كل منها في اتجاه .

ومهما ألححتُ على ان الضوء مصنوع من جسيمات ، فلن أفي هذا الواقع حقه . ومن المهم جداً ـ لا سيما لمن دخل منكم المدارس وقيل له هناك إن الضوء يتصرف كموجة ـ أن تعلموا أن الضوء يتصرف كجسيمات . صدقوني : إن الضوء يتصرف في الحقيقة كجسيمات .

قد يعترض بعضكم مدعياً أن المضاعف الفوتوني ، الذي يكشف الضوء ، هو الذي يشعر به بذلك الشكل الجسيمي . لكن الواقع أن كل الأجهزة المصممة لتستطيع كشف الشدات الضوئية الضعيفة تعطي النتيجة نفسها : إن الضوء مصنوع من جسيمات .

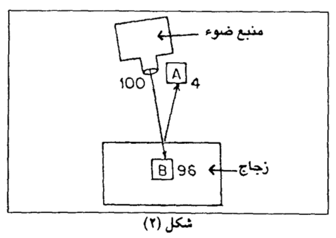
أعتقد أنكم تعرفون كل الخصائص التي يُبديها الضوء في الحياة اليومية؛ تعرفون أنه يذهب في خط مستقيم ، وأنه ينكسر عند نقطة دخوله في الماء ، وأنه ينعكس «يرتد» عن المرآة بزاوية تساوي زاوية وروده عليها ، وأن بالإمكان تفكيك الضوء المزيج إلى ألوان شتى (لابد أنكم قد رأيتم الألوان التي تظهر على سطح بقعة من الزيت طافية على سطح الماء) ، وأن أشعته تتقارب معا بعد إختراق عدسة زجاجية ، إلخ . إن هذه الظواهر ، المعروفة جيداً ،ستفيدني في إيضاح السلوك العجيب للضوء ؛ أي إنني سوف أُفسر هذه الظواهر العادية بلغة الإلكتروديناميك الكمومي ، وذلك على غرار استخدام المضاعف الفوتوني لإبراز ظاهرة جوهرية لم تعتادوها ؛ إن الضوء مصنوع من جسيمات . وآمل الآن أن تكون هذه الظاهرة أيضا قد اصبحت مألوفة لديكم .

أعتقد أنكم تعرفون جميعًا أن الضوء ينعكس جزئياً عن سطح مادة شفافة كالماء . تذكروا العديد من اللوحات الفنية الممتعة التي تصور بحيرة انعكس على سطحها ضوء القمر . فعندما نشاهد سطح الماء نرى في آن واحد (لا سيما في النهار) ما يوجد في أعماق الماء تحت سطحه ، وما ينعكس عن هذا السطح . وللزجاج سلوك مماثل : فإذا أشعلتم في وضح النهار مصباحاً في غرفة ونظرتم نحو الخارج ، ترون في آن

واحد الأشياء الموجودة في الخارج وخيال المصباح (خافتاً) في زجاج النافذة . وهذا يثبت أن الضوء ينعكس جزئياً بفعل سطح الزجاج .

قبل أن أستمر في هذه المسيرة أُحب أن ألفت انتباهاكم إلى تبسيط أعتمده الآن وسوف أُصلحه فيما بعد . عندما أقول : إن الضوء ينعكس جزئياً بفعل الزجاج ، أفترض أن الضوء لا ينعكس إلا بفعل سطح هذا الزجاج . فالواقع أن قطعة الزجاج مخيفة التعقيد ؛ إنها تحوي عدداً هائلا من الإلكترونات مضطربة في كل الاتجاهات ، ومن شأن الفوتون الذي يسقط عليها أن يتفاعل مع كل الإلكترونات الموجودة في قطعة الزجاج - وليس فقط مع تلك الموجودة عند السطح ؛ وهذا يجعل الفوتونات والإلكترونات تؤدي رقصة من نتائجها أن يجري كل شيء وكأن الفوتون لا يتعامل إلا مع سطح الزجاج . وعلى هذا الأساس ، وبغية التبسيط ، سأفترض أن هذا هو الذي يحدث ؛ وسأشرح لكم فيما بعد ما يحدث حقاً في الزجاج ، وستفهمون لماذا لا يغيِّر هذا الافتراض شيئاً.

سأشرح لكم الآن تجربة تدهشكم بنتيجتها . تتلخص هذه التجربة بإرسال فوتونات من لون واحد - ولنقل الأحمر - على قطعة من الزجاج . الفوتونات صادرة عن المنبع S ، وأضع مضاعفاً فوتونياً في A (شكل ٢) ، بحيث يلتقط الفوتونات التي عانت انعكاساً عن سطح الدخول إلى الزجاج . ولكي أقيس عدد الفوتونات التي تتوغل في الزجاج اضع مضاعفاً فوتونياً آخر في B ضمن الزجاج . لا تبالوا بالصعوبات التي نذللها لوضع هذا المضاعف الفوتوني ضمن الزجاج ، ولكن اسألوا أنفسكم بالأحرى عن نتيجة هذه التجربة .

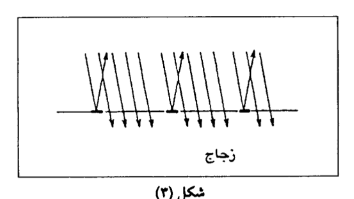


شكل (٢)

تجربة تتجلى فيها ظاهرة الانعكاس الجزئي عن سطح الزجاج ، إن 4 فوتونات فقط ، من أصل كل مئة فوتون تتجه من المنبع إلى الزجاج عمودية عليه ، ترتد عن سطح الزجاج إلى المضاعف الفوتوني A . أما الـ 96 فوتوناً الأخرى فتخترق السطح ذاهبة إلى المضاعف الفوتوني الآخر B.

الواقع أن من بين كل 100 فوتون تصل عـمـودياً إلى سطح الزجاج ، لا ينعكس عنه نحو A سوى 4 فوتونات ، ويذهب البـاقي ، 96 فوتوناً ، إلى B . فـفي هذه الحالة بالذات تكون نسبة «الانعكاس الجزئي» ، عن سطح الدخول في الزجاج ، مساوية 4٪؛ ويتوغل البـاقي ، أي 96٪ ، ضمن الزجاج . فنحن منذ الآن نصادف الصعوبة الأولى . كيف يتسنى للضوء أن لا ينعكس إلا جزئياً ، في حين أنه يمكن لكل فوتون أن يذهب إما إلى A ، واما إلى B ؟ فما هو المعيار الذي «يقرر» الفوتون بموجبه أن يذهب إما إلى A وإما إلى B؟ قد لا تبدو صيغة هذا السؤال ذات شأن ، لكن هذا الواقع ذو شأن كبير . لأن من واجبنا أن نجد تفسيراً له . إننا في هذه الظاهرة نقرأ تحير نيوتن قبلنا في أمره .

نستطيع ، لتفسير ظاهرة الانعكاس الجزئي هذه ، أن نتخيل عدة نظريات . يمكن أن نفكر مثلاً بأن سطح الزجاج يتألف ، بنسبة 96٪ منه ، من «ثقوب» يمر الضوء عبرها ، ومن حواجز صغيرة مادية ، بنسبة 4٪ ، تردّ الفوتون إلى حيث أتى (شكل٣) . كان نيوتن أول من فهم أن هذا ليس التفسير الحقيقي[1] . وسنصادف بعد قليل خاصية للانعكاس الجزئي جد عجيبة ، شيئاً يبعث على الجنون لدى كل من يحاول أن يتمسك بنظرية من قبيل «ثقوب وحواجز» (وكذلك بأية نظرية يبدو فيها شيء من «المعقولية» مهما صَغُر) .



شكل (٣)

لتفسير ظاهرة الانعكاس الجزئي يمكن أن نتصور نظرية تقول بأن سطح الزجاج يتألف أساسياً من «ثقوب» تسمح بمرور الضوء ، ومن بضعة «حواجز» متفرقة تعكس الضوء .

---

(١) كيف توصل نيوتن لهذه النتيجة؟ لقد كتب : «السبب أنني أستطيع أن أصقل الزجاج» . ربما تتساءلون كيف أن إمكانية صقل الزجاج تعني أن سطحه غير مؤلف من ثقوب وحواجز . كان نيوتن يصقل بنفسه عدساته ومراياه ، ويعلم أن الصقل يعني خدش الزجاج بوساطة مسحوق أنعم فأنعم . ولدى الاستمرار في تنعيم هذه الخدوش يتحول سطح الزجاج من العتامة التي كان فيها «لأن الضوء يتناثر عن جدران وقيعان الخدوش الخشنة العميقة» إلى الشفافية التي يكتسبها (لأن الخدوش القليلة العمق تدع الضوء يمر) . فاستنتج من ذلك أن الضوء لا يمكن أن يتأثر بوجود اختلالات صغيرة غير مرتبة ، سواء كانت خدوشاً أم ثقوبا أم حواجز . بل إن العكس هو الصحيح : إن الخدوش الأنعم (وبالتالي الثقوب والحواجز ذات الأبعاد المتساوية في النعومة) لا تؤثر في الضوء بتاتا . وعل هذا يكون تفسير الانعكاس الجزئي بثقوب وحواجز صغيرة ، عند سطح الزجاج ، غير صحيح .

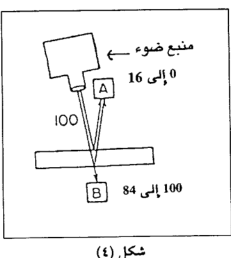
يمكن أيضا أن نتخيل أن الفوتونات تمتلك آلية داخلية ، نوعاً من «المسننات» يمكن أن يعمل بهذا الاتجاه لابذاك ، بحيث أن الفوتون يخترق السطح عندما يكون الفوتون «مدبَّرًا» بشكل مناسب وينعكس عنه في غير ذلك . ولكي نمتحن هذه النظرية ،لنحاول أن «نُصفّي» الفوتونات بمصفاة تمنع من اختراقها الفوتونات غير «المُدبَّرة» بشكل مناسب .

ومن أجل ذلك نضع بين المنبع وسطح الزجاج سلسلة من صفائح زجاجية . عندئذ لن يصل إلى سطح الدخول في قطعة الزجاج ، سوى الفوتونات «المدبَّرة» بشكل مناسب ، لأن غير المدبرة تنحجب بمصافي سلسلة الصفائح التي تعترض طريقها ؛ وعندئذ يجب على كل هذه الفوتونات المدبرة أن تخترق سطح قطعة الزجاج ، وأن لا ينعكس عنه أي منها . لكن ،لسوء حظ هذه النظرية (نظرية الفوتونات المدبّرة سلفاً) ، ليس هذا هو الذي يحدث : بل إن نسبة ما ينعكس منها، عن سطح قطعة الزجاج ، تظل على قيمتها ، 4% ، رغم مصفاة الصفائح الزجاجية مهما كان عددها .

بالرغم من كل جهودنا ، في تخيل نظرية «معقولة» لفهم كيف «يقرر» الفوتون اختراق السطح أو الانعكاس عنه ، يتبين أن من المستحيل التنبؤ عما سيحدث للفوتون الواحد عندما يصل إلى سطح الزجاج . وإذا صدَّقنا الفلاسفة ، بأن الأسباب نفسها لا تقود إلى النتائج نفسها ، يصبح التنبؤ مستحيلاً والعلم ذا حدود . فنحن هنا أمام سبب واحد معين ـ واقع أن الفوتونات المتماثلة تسقط ، بزاوية ورود واحدة ، على وجه القطعة الزجاجية الوحيدة نفسها ـ يقود إلى مفعولين مختلفين ـ انعكاس أو نفاذ ـ ولا يمكن أن نتنبأ إذا كان الفوتون سيذهب إلى A أو سينفذ إلى B . وكل ما نستطيع أن نقوله هو أن 4 فوتونات ، وسطياً ، من أصل 100 فوتون واردة ، ستنعكس عن سطح الزجاج . فهل يجب أن نستنتج أن الفيزياء ، ذلك العلم الذي يمتاز بصحته ، قد نزلت إلى درك أن لا تحسب سوى احتمالات ، وأنها عاجزة عن التنبؤ بالضبط عما سيحدث؟ نعم ، إن الفيزياء مضطرة للتخفيف من غلوائها وطموحاتها . فالواقع هكذا ، ولا حيلة لنا فيه . ولا تبيح لنا الطبيعة أن نحسب سوى الاحتمالات . لكن العلم لم يجد بهذا الواقع حدوده! .

إذا كان الانعكاس الجزئي عن سطح ذا شأن يثير الدهشة ،فإن الانعكاس الجزئي عن سطحين متواليين يثير الجنون ً وإليكم السبب . لنتخيل إجراء تجربة أخرى تهدف إلى قياس نسبة الانعكاس الجزئي للضوء عن سطحين . وفي هذا

السبيل نستبدل بالقطعة الزجاجية السابقة صفيحة زجاجية رقيقة جداً ذات وجهين متوازيين تماماً .لنضع الآن المضاعف الفوتوني B بعد السطح الثاني باتجاه الحزمة الواردة . عندئذ تستطيع الفوتونات أن تنعكس إما عن وجه الدخول («الوجه الأمامي») وإما عن وجه الخروج («الوجه الخلفي») . نلتقط الفوتونات المنعكسة عن الوجهين في المضاعف A ، أما الأخرى ، النافذة من الصفيحة ، فتذهب إلى المضاعف B . (شكل ٤) فلأول وهلة نتوقع بأن 4% فقط من الضوء ينعكس عند سطح الدخول ، وأن وجه الخروج سيعكس بدوره 4% من الـ 96% الباقية ، أي أن مجمل نسبة الانعكاس ستكون (تقريباً) 8% . وهكذا نتوقع أن ينعكس ، نحو A ،قرابة 8 فوتونات من أصل كل 100 فوتون تأتي من المنبع .



شكل (٤)

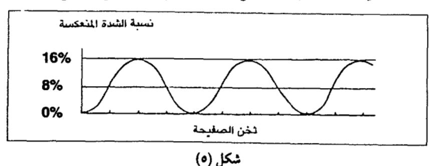
تجربة تُري الانعكاس الجزئي عن وجهي صفيحة متوازيين ، الفوتونات الداخلة في المضاعف الفوتوني A كانت قد انعكست إما عن وجه الدخول في الصفيحة (بالوجه الأمامي) وإما عن وجه الخروج منها (الوجه الخلفي) . يمكن للفوتون أيضا أن يخترق السطحين (الصفيحة كلها) ويدخل في المضاعف الفوتوني B. بحسب ثخن الصفيحة تتغير نسبة الفوتونات المرتدة إلى A بين 0 و 16% ، إن من الصعب تفسير هذه النتيجة بنظرية «معقولة» ، كتلك المذكورة في الشكل ٣ (ثقوب وحواجز) . الأمور كلها تجري كما لو أن الانعكاس عن سطح معين يمكن أن ينطفىء أو أن يتضخم بوجود سطح ثان .

لكننا إذا أجرينا التجربة فعلاً نتبين أن عدد الفوتونات التي تصل إلى A لا يساوي 8 إلا نادراً .فمع بعض الصفائح الزجاجية يمكن لهذا العدد أن يبلغ 15 أو 16 فوتوناً تصل بانتظام إلى A ،أي ضعفي العدد المتوقع . وفي مقابل ذلك ، ومع صفائح أخرى ، لا يصل إلى A عملياً سوى فوتون واحد أو اثنين . وهناك من الصفائح ما يعطي نسبة وصول إلى A تساوي 10% ،وأخرى تعدم الانعكاس الجزئي تماماً! فكيف نفسر هذه الأمور الغريبة؟ إننا ، إذا درسنا ظروف هذه التجربة بعناية ، نتبين ، بعد التأكد من جودة كل صفيحة نستخدمها ومن تجانس زجاجها ، أن تلك الصفائح لا تختلف فيما بينها إلا بالثخن .

وللتأكد من هذا الدليل الأولي ـ من أن نسبة ما ينعكس عن الوجهين تتعلق بثخن الصفيحة المستعملة ـ نجري التجارب التالية . نبدأ باستعمال صفيحة رقيقة جداً بقدر الإمكان ؛ بعد أن نَعدَّ الفوتونات الواصلة إلى A ، من أصل كل 100 تأتي من المنبع ، نبدّل هذه الصفيحة الأولى بصفيحة أخرى ، من الزجاج نفسه ولكن أكبر ثخناً بقليل ، ونعدُّ من جديد الفوتونات الواصلة إلى A (من أصل 100 من المنبع) . وهكذا دواليك ، مع صفائح أكبر فأكبر ثخناً . فما الذي نحصل عليه؟ .

نلاحظ ، من أجل الصفيحة الأولى الرقيقة جداً ، أن عدد الفوتونات التي ترتد نحو Aيكاد يكون معدوماً (واحداً على الأكثر بين الفينة والأخرى) . وأن من أجل صفيحة أثخن من الأولى بقليل نحصل على نسبة انعكاس أكبر ، وتتزايد هذه النسبة ، مقتربة من 8% المتوقعة ، بتزايد ثخن الصفيحة المستعملة شيئاً فشيئاً . لكننا نجد ، لدى ازدياد ثخن الصفيحة بأكثر من ذلك ـ عندما يصل إلى قرابة جزء من عشرة آلاف جزء من الميليمتر ـ أن نسبة الانعكاس المقيسة تتجاوز 8% وتستمر في التزايد حتى تبلغ 16% ، ثم تتناقص مارة بـ 8% حتى تنعدم من جديد (إن نسبة الانعكاس تنعدم تماماً من أجل ثخن معين تماماً) . حاولوا الآن ، عبثاً ، أن تتخيلوا آلية من نوع «ثقوب وحواجز» لتفسير هذه العجائب! .

إذا استمررنا في زيادة ثخن الصفيحة تعود نسبة الانعكاس إلى التزايد من جديد حتى تبلغ 16% ثم تتناقص إلى الصفر . وهكذا نحصل في خاتمة المطاف على ظاهرة دورية تتكرر قدر ما نشاء (شكل ٥) . كان نيوتن قد لحظ هذه الظاهرة الدورية (الاهتزازية) ، حتى أنه نفَّذ تجربة لم يمكن تفسيرها بالضبط إلا بافتراض أن الظاهرة تتكرر كما هي ٣٤٠٠ دورة . واليوم نستطيع باستعمال ضوء الليزر (وهو ضوء وحيد اللون صاف جداً) أن نلحظ هذه الاهتزازات على مدى أكثر من مئة مليون دورة ـ وهذا العدد بثخن يصل إلى خمسين متراً! (ولئن كنا لا نلحظ هذه الظاهرة في الحياة اليومية ، فما ذلك إلا لأن منابعنا الضوئية ليست وحيدة اللون عموماً).



شكل (٥)

إن التجارب ، التي تقيس بعناية نسبة الانعكاس الجزئي بدلالة ثخن الصفيحة الزجاجية ، تدل على حدوث ظاهرة «تداخل» . كلما ازداد ثخن الصفيحة تغيرت نسبة الانعكاس ، بشكل دوري متناوب ، بين 0 و 16% دون أي اضمحلال .

يظهر في النهاية أن توقعنا للنسبة 8% صحيح وسطياً (لأن النسبة الملحوظة تتغير بين 0% و 16%) ، لكنها لا تحدث بالضبط إلا مرتين فقط في الدورة الواحدة ، - وهذا يكاد يشبه ميقاتية معطلة تشير إلى الوقت الصحيح مرتين في اليوم . فكيف نفسر هذا الواقع الغريب ، أي أن الانعكاس الجزئي يتعلق بثخن الصفيحة الزجاجية؟ وكيف نفسر أننا نحصل في حال سطح واحد على نسبة انعكاس تساوي 4% (كما رأينا في تجربتنا الأولى) وأننا ، عندما نضع سطحا ثانياً على مسافة مناسبة من الأول ، «نُطفىء» الضوء المنعكس؟ وكيف نفسر أن «تتضخم» نسبة الانعكاس بمجرد أن ننقل السطح العاكس الثاني ولو بمسافة قصيرة ، وأن تبلغ 16% أحياناً؟ هل يجب أن نعتقد أن السطح الثاني يؤثر في الأول ويعدّل مقدرته على أن يعكس الضوء؟ وماذا يحدث لو وضعنا سطحا ثالثاً؟

لو استخدمنا ثلاثة سطوح ، أو حتى أي عدد من السطوح ، فان نسبة الانعكاس تتعدل من جديد . والواقع أننا ، مهما أضفنا من سطوح متوالية ، لا نحصل على سطح يمكن أن نقول بأنه «الأخير» . فهل يجب على الفوتون أن يخترق كل هذه السطوح قبل أن «يقرر» فيما إذا كان سينعكس عن أحدها أم لا؟ .

لقد استنبط نيوتن نظرية قائمة بذاتها وذكية جداً كي يفسر هذه الظاهرة(*) . لكنه اضطر في النهاية إلى الاعترف بأن نظريته لم تكن مُرضية .

لقد اقتضى تفسير ظاهرة الانعكاس الجزئي سنين طويلة من الانتظار قبل أن

(*) إن من حسن حظنا أن نيوتن كان مقتنعا بالطبيعة « الجسيمية » للضوء : لأن ذلك كشف لنا نوع المحاكمة التي يجب أن يلجأ إليها الذهن الذكي المتفتح عندما يسعى إلى تفسير ظاهرة انعكاس الضوء عن عدة سطوح متوالية . (إن أنصار النظرية الموجية في الضوء لم يصادفوا قط هذا النوع من المشاكل) . كانت محاكمة نيوتن كما يلي . صحيح أن الضوء يبدو منعكساً عن السطح الأول ، لكن الواقع غير ذلك بتاتاً : أي أن الضوء لا يمكن أن ينعكس بهذا السطح . إذا لو انعكس الضوء به فلا نرى كيف يمكن أن «يأسره» السطح الثاني بعدئذ (عندما تكون المسافة بين السطحين ملائمة لانعدام الانعكاس) . فالواقع إذن أن الضوء ينعكس بالسطح الثاني . يبقى أن نفسر لماذا تتحكم المسافة بين السطحين بنسبة الإنعكاس . اقترح نيوتن الفكرة التالية : إن الضوء الساقط على السطح الأول يثير نوعاً من الموجة (أو من الحقل) تنتشر مع الضوء في أن واحد و «تُدبِّره» بما يجعله ينعكس (أو لا ينعكس) بالسطح الثاني ؛ والضوء يُبدي عندئذ «سورات» انعكاس (أو اختراق) متفاوتة تتغير شدتها بشكل دوري مع تغير ثخن الصفيحة الزجاجية .

لكن هذه الفكرة تنطوي على صعوبتين : أولاً ،كيف نفسر المفعول الذي ذكرناه منذ قليل لسطح ثالث؟ ثانياً ، الواقع أن الضوء ينعكس بسطح البحيرة ، وهي ذات سطح واحد ،فالضوء ينعكس حتماً إذن بالسطح الأول . لقد تصور نيوتن ،لتفسير الانعكاس عن سطح واحد وحيد ، أن الضوء «ميال الى» الانعكاس . لكن قبول هذه الفكرة يقضي بافتراض أن الضوء ، عندما يصل إلى سطح ما ، يعلم إذا كان هذا السطح وحيداً أم لا . لكن نيوتن لم يتوسع في هذه الصعوبات رغم أنه لم يجهلها . وفي عصره كان العلماء يمرون مرور الكرام بالصعوبات التي تكتنف نظرية ما ؛ كان الانزلاق سهلاً . أما اليوم فنحن ، بعكس ذلك ، نجهد في استخراج النقاط التي تطرح مشاكل في النظرية ولا تتفق مع النتائج التجريبية . وأنا بهذا القول لا أريد انتقاد نيوتن ، بل أن امتدح الطريقة التي يتبعها الباحثون اليوم في تبادل المعلومات .

تأتي النظرية الموجية(*) لتفسيرها بشكل مُرْض . وبعد ذلك بكثير أُجريت تجارب بضوء ضعيف جداً ،فحان دور النظرية الموجيةً في ملاقاة الصعوبات . ذلك أن المضاعفات الفوتونية ظلت تُصدر «تكات» كذي قبل ، مهما أمعن المجرِّب في إضعاف الضوء ، وكل ما حدث أن عددها يصبح أصغر فأصغر . وهكذا ظهر أن الضوء يتصرف كمجموعة جسيمات .

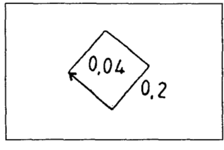
واليوم تتجلى الأمور على الشكل التالي : إننا لا نملك نموذجاً نظرياً يتيح تفسير ظاهرة الانعكاس الجزئي بسطحين ؛ ولا نستطيع أن نحسب سوى احتمال أن يستقبل المضاعف الفوتوني فوتوناً منعكساً بفعل صفيحة زجاجية . وقد اخترت أن أبيِّن لكم ،في هذا المثال ،كيف تعمل طريقة الحساب التي يقدمها لنا الإلكتروديناميك الكمومي . سأشرح لكم كيف «نَعُدُّ حبات الفاصولياء» ، كيف يتدبر الفيزيائيون أمرهم للحصول على الجواب الصحيح . فأنا إذن لن أريكم كيف «يقرر» الفوتون أن ينعكس عن سطح الزجاج أو أن يخترقه . فهذا شيء لا نعلمه ، وهو سؤال مطروح على الأرجح في غير موضعه . سأريكم فقط كيف نحسب ، دون غلط ، احتمال أن ينعكس الفوتون عن صفيحة زجاجية ذات ثخن معلوم ؛ وهذا كل ما يقدر الفيزيائيون على حسابه! والطريقة التي يستخدمونها لحل هذه المسألة الخاصة جداً تشبه تلك التي تُستخدم في حل أية مسألة تنتمي إلى الإلكتروديناميك الكمومي .

والآن انتبهوا : أمسكوا بأنفسكم ، اربطوا الأحزمة! وهذا ليس لأن ما سأشرحه لكم ذو صعوبة خاصة على الفهم ، بل ببساطة ، لأنه سيبدو لكم جد مثير للهُزْء. احكموا بأنفسكم : كل ما في الأمر أننا نرسم أسهماً صغيرة على ورقة عادية! لا أكثر ولا أقل .

لابد أنكم تتساءلون : أية علاقة يمكن أن توجد بين سهم نرسمه وبين احتمال أن يقع حادث ما؟ فإليكم هي : إن من شأن قواعدنا ، التي تحكم طريقة «عدِّ حبات

(*) تقول هذه النظرية بأن الضوء أمواج يمكن أن تنضم متراكبة ،فإما أن تتعزز بعضاً ببعض ، وإما أن تتفانى . والحسابات في هذه النظرية تتفق تماماً مع نتائج تجارب نيوتن ،وكذلك مع كل التجارب التي أُجريت خلال قرون بعده . ثم جاء عهد صنع أجهزة حساسة لكشف فوتون واحد . وكانت النظرية الموجية تتنبأ أن «التكات» يجب أن تكون أضعف فأضعف . لكن الواقع أن لها كلها شدة واحد ، لكن عددها يتناقص ـ ولم يكن يوجد نظرية قادرة على تفسير كل ذلك . ثم جاء وقت وُضع فيه على المحك ذكاء الفيزيائيين : كان يقال إن الضوء يمكن أن يتصرف . . حسب الظروف التجريبية ،إما كموجة وإما كمجموعة جسيمات . وهذا ما دُعي باسم «المثنوية duality موجة/ جسيم» . ويمكن أن يقال عن ذلك العصر ، بنوع من المزاح ، إن الضوء موجة أيام الاثنين والأربعاء والجمعة ، ومجموعة جسيمات أيام الثلاثاء والخميس والسبت . ويبقى الأحد للتفكير في الموضوع . وأنا أنوي هنا أن أُبين لكم أن هذا السر قد انجلى اليوم نهائياً.

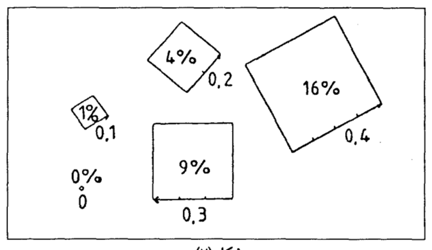
الفاصولياء» ، أن تجعل احتمال وقوع حادث ما مساوياً مُربَّع طول سهم ، لنضرب مثلاً على ذلك حالة تجربتنا الأولى (حين كنا نقيس نسبة الانعكاس الجزئي عن سطح وحيد ،شكل (٢) . فقد وجدنا فيها أن احتمال وصول الفوتون إلى المضاعف الفوتوني A كان مساويا 4% ؛ فيتعلق به سهم طوله 0.2 ـ لأن مربع 0.2 يساوي 0.04 (شكل ٦) .



شكل (٦)

الصفات العجيبة لظاهرة الانعكاس الجزئي أجبرت الفيزيائيين على التخلي عن الأمل في التنبؤ الدقيق وعلى الاكتفاء بحساب احتمال وقوع هذا الحادث أو ذاك . أما الطرائق المقترحة لهذا الغرض في الالكتروديناميك الكمومي فتقضي برسم أسهم صغيرة على قطعة من الورق! واحتمال وقوع حادث معين يتمثل بمساحة المربع الذي طول ضلعه السهم المتعلق به . فالسهم الذي يمثل احتمالاً قيمته 0,04 (4%) ، مثلاً يكون طوله 0,2.

في التجربة الثانية شكل (٤) ، حيث استعملنا صفيحة زجاجية رقيقة ذات ثخن متزايد ، كان المضاعف الفوتوني A يستقبل فوتونات انعكست إما عن وجه الصفيحة الأول وإما عن وجهها الثاني . فما نوع السهم الذي سنرسمه لتمثيل هذا الظرف؟ إننا نريد سهماً يتغير طوله بين الصفر و 0.4 كي يعطي ، عندما نُربِّعه ، احتمالاً يتغير بين الصفر و 16% حسب ثخن الزجاج (شكل ٧) .



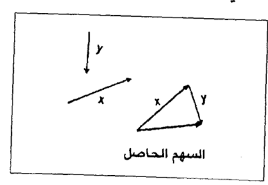
شكل (٧)

أسهم تمثل احتمالات تتغير من 0 إلى 16% ؛ أطوالها تتغير بالتوالي من 0 إلى 0,4

لنفحص شتى الخيارات المتاحة للفوتون في الذهاب من المنبع إلى المضاعف الفوتوني A . لما كنت قد افترضت ، بغية التبسيط ، أن الفوتون ينعكس إما عن سطح الدخول الأمامي وإما عن سطح الخروج الخلفي للزجاج ، كان عدد الخيارات المتاحة للذهاب إلى A اثنين . في هذه الحال نرسم سهمين اثنين ـ واحداً لكل خيار يمكن أن يحقق الحادث المقصود ـ ، ثم نركِّب هذين السهمين للعثور على ما نسميه السهم الحصيلة (أو الحاصل) الذي يمثل مربعُه احتمالَ وقوع الحادث المقصود . إذا كان الحادث يمكن أن يقع بثلاثة خيارات ، يصبح علينا أن نرسم ثلاثة أسهم ثم نركِّبها للعثور على الحصيلة .

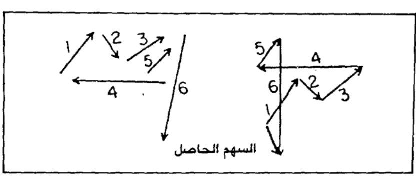
عليّ الآن أن أُريكم كيف نركب الأسهم . لنفترض أننا نريد تركيب السهم المرموز له بـ x مع السهم المرموز له بـ y (شكل ٨) . لأجل ذلك يكفي أن نطبق ذيل السهم y على رأس السهم x (دون أن نغير اتجاه أي من السهمين) ، ثم أن نرسم سهماً يذهب من ذيل x إلى رأس y . هذه هي عملية التركيب كلها ، .فهذا السهم الجديد هو الحصيلة . نستطيع بهذه الطريقة أن نركِّب أي عدد من الأسهم (نقول ، باللغة الفنية ، إننا «نجمع» الأسهم) ، ويمثل كل سهم اتجاهاً وطولاً جزءاً من خط متعرج (شكل ٩) ، ويشير السهم الحصيلة (ذلك الذي يذهب من ذيل السهم الأول إلى رأس السهم الأخير) إلى كيفية العمل للذهاب مباشرة إلى النقطة النهائية بخطوة واحدة .

ما هي القواعد التي تحكم طول واتجاه كل واحد من الأسهم التي يعطي جمعها السهم الحصيلة؟ ليس لدينا في الوقت الراهن سوى سهمين ، أولهما يمثل الانعكاس عن الوجه الأمامي ويمثل الآخر الانعكاس عن الوجه الخلفي .



شكل (٨)

الأسهم التي تمثل شتى أساليب وقوع الحادث المتاحة تُرسم ثم تُركَّب (تُجمع) معاً وفق الطريقة التالية : نضع ذيل أحد الأسهم (هنا y) على رأس السهم الذي قبله (x) دون أي تغيير في اتجاه أي سهم ؛ نرسم السهم الحصيلة من ذيل السهم الأول x إلى رأس السهم الاخر y.



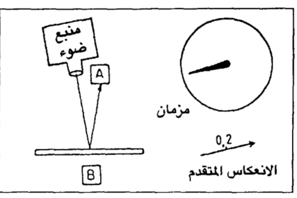
شكل (٩)
نستطيع ، بطريقة الشكل ٨ ، جمع أي عدد من الأسهم .

لنبدأ بالطول . لقد تبين لنا ، من التجربة الأولى (عندما وضعنا مضاعفاً فوتونياً في الزجاج) أن وجه الدخول يعكس 4% من الفوتونات التي يستقبلها . فنستنتج من ذلك أن أن طول السهم الأول ، الذي يمثل الانعكاس «الأمامي» ، يساوي 0.2 . كما أن الوجه الخلفي ، الذي يعكس أيضاً 4% من الضوء ، يمثله سهم طوله 0.2 أيضاً.

ولتعيين اتجاه كل سهم يجب أن نتخيل عملية قياس الزمن الذي يستغرقه كل فوتون في مساره . لنتخيل إذن مزماناً (كرونومتراً chronometer) يدور عقربة بسرعة كبيرة . نحرر عقرب المزمان فور انطلاق الفوتون من المنبع ، فيدور عقربه عدة دورات في أثناء سير الفوتون (قرابة ١٥٠٠٠ دورة لكل سنتيمتر من المسار ، إذا كان الضوء أحمر) . نوقف عقرب المزمان فور وصول الفوتون إلى المضاعف الفوتوني . يكون العقرب عندئذ قد اتخذ اتجاهاً معيناً ؛ ذلك هو اتجاه السهم الذي يتعلق بهذا الفوتون .

عند هذه المرحلة يجب أن أُضيف قاعدة أخرى كي يمكن حساب الجواب الصحيح . سنصطلح على أن نعكس اتجاه السهم كلما انعكس الفوتون عن وجه الدخول (أي الوجه الأمامي) . وبتعبير آخر : نعتمد أن السهم الممثل للفوتون المنعكس عن الوجه الخلفي يتخذ اتجاه العقرب ، ونعتمد الاتجاه المعاكس من أجل الفوتون الذي ينعكس عن الوجه الأمامي .

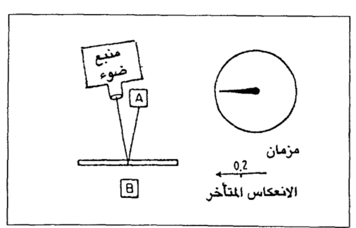
لنرسم الآن السهمين المتعلقين بالارتداد عن الصفيحة الزجاجية الرقيقة جداً . فلكي نرسم السهم المتعلق بالانعكاس عن وجه الدخول نتخيل فوتوناً يغادر المنبع (نطلق عقرب المزمان) فينعكس عن وجه الدخول ، ويصل أخيراً إلى A (نوقف العقرب) . نرسم بعدئذ سهماً صغيراً طوله 0.2 في الاتجاه المعاكس لاتجاه العقرب (شكل ١٠) .



شكل (١٠)

تحليل التجربة التي توضح الانعكاس بسطحين . إن الفوتون يستطيع الوصول إلى A بأسلوبين : مروراً بالوجه الأمامي أو مروراً بالوجه الخلفي . وبكل من هذين الطريقين نعلق سهما طوله 0.2 ، أما اتجاه كل سهم فيتعين بالوضع الذي يقف وفقه عقرب «مزمان» يقيس الزمن الذي يستغرقه الفوتون على الطريق المسلوك . لكن يجب علينا ان نعطي السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الأمامي فقط اتجاها معاكسا للاتجاه الذي يقف عنده العقرب لحظة وصول الفوتون إلى A.

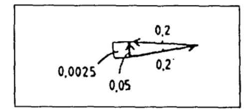
ولرسم السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الخلفي نتخيل أن فوتوناً يغادر المنبع (نطلق العقرب) ثم يخترق وجه الدخول ، ثم ينعكس عن الوجه الخلفي ليخرج بعدئذ من الصفيحة حتى يصل إلى A (نوقف العقرب) . في هذه الحال (صفيحة بالغة الرقة جداً) يكون اتجاه العقرب هو نفس الاتجاه تقريباً ، الذي رسمناه منذ قليل . وسبب ذلك أن المسافة التي يقطعها هذا الفوتون ، بين المنبع و A ،تكاد تساوي (بسبب رقة الصفيحة) مسار الفوتون الذي ينعكس عن الوجه الأمامي : فهذان المساران لا يختلفان إلا بضعفي ثخن الصفيحة (وهو بالغ الصغر) . وعلى ذلك نرسم سهماً ثانياً ، طوله 0.2 ، في عكس اتجاه السهم الأول (شكل ١١) .



شكل (١١)

الفوتون المنعكس بالسطح الخلفي الزجاج يستغرق ، للذهاب من المنبع إلى A ، زمنا أطول بقليل من زمن الفوتون الذي ينعكس عن الوجه الأمامي . وعقرب المزمان ، عندما يقف ، يشير إذن إلى اتجاه مختلف قليلاً عن الزمن المتعلق بالانعكاس الأمامي ، والسهم المتعلق بالانعكاس الخلفي يُعطي نفس اتجاه توقف العقرب .

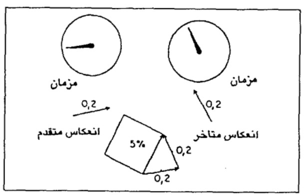
علينا الآن أن نجمع هذين السهمين (جمعاً «سهمياً») . ولما كان لهما طول واحد واتجاهان شبه متعاكسين ، يكون السهم الحصيلة شبه معدوم ، ومُربعه أقرب إلى الصفر منه . فاحتمال أن يرتد الضوء عن صفيحة زجاجية رقيقة جداً شبه معدوم إذن (شكل ١٢) .



شكل (١٢)

السهم الحصيلة ، الذي يمثل مربعه احتمال الانعكاس عن وجهي صفيحة زجاج بالغة الرقّة جداً ، ينتج من جمع السهم المتعلق بالانعكاس الأمامي مع السهم المتعلق بالانعكاس الخلفي . طول السهم الحصيلة هنا شبه معدوم .

إذا بدّلنا الصفيحة الرقيقة جداً بأخرى أثخن بقليل ، فإن الفوتون الذي ينعكس عن الوجه الخلفي يقطع في الزجاج ، قبل أن يبلغ A ، مسافة أطول ؛ مما يتيح للعقرب أن يدور أكثر قليلاً قبل أن يتوقف ؛ فيصنع السهم المتعلق بهذا الفوتون زاوية محسوسة مع السهم المتعلق بالفوتون الذي ينعكس عن الوجه الأمامي ؛ فيكون السهم الحصيلة إذن أطول مما كان في حالة الصفيحة البالغة الرقة ؛ وكذلك يكون مربعه (شكل ١٣) .

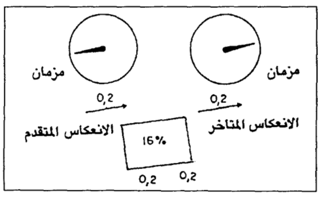


شكل (١٣)

السهم الحصيلة المتعلق بثخن زجاجي أكبر بقليل يكون أطول قليلاً لأن الزاوية بين السهمين (سهم الانعكاس الأمامي وسهم الانعكاس الخلفي) أكبر . تزايد هذه الزاوية ناجم عن أن الفوتون المنعكس عن الوجه الخلفي يستغرق ، للذهاب إلى A ، زمناً يزداد بازدياد الثخن.

لنضرب مثلاً آخر ، صفيحة زجاجية ذات ثخن من شأنه أن يتيح لعقرب المزمان أن يدور نصف دورة بالضبط في أثناء الزمن الذي يستغرقه الفوتون ، الذي ينعكس عن الوجه الخلفي ، في الذهاب والإياب ضمن الصفيحة. في هذه الحالة

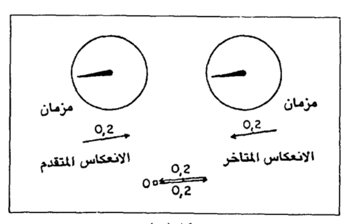
يكون اتجاه السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الخلفي هو نفس اتجاه السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الأمامي. فاذا جمعنا هذين السهمين (طول كل منهما 0.2) نجد أن طول السهم الحصيلة (شكل ١٤) يساوي 0,4 فيكون مُربعه ، أي 0.16، الاحتمالَ المطلوب .



شكل (١٤)

عندما يكون للزجاج ثخن يجعل عقرب المزمان يقوم ، من أجل الانعكاس الخلفي ، بنصف دورة زيادة عن حال الانعكاس الأمامي ، يصبح للسهمين اتجاه واحد ؛ فيكون السهم الحصيلة مساوياً 0.4 ؛ أي أن احتمال وصول الفوتون إلى A يصبح 16% .

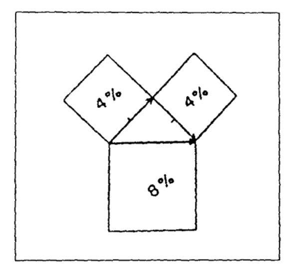
إذا زدنا في ثخن الصفيحة الزجاجية ليبلغ قيمة تجعل العقرب يدور دورة كاملة لدى اختراق الفوتون (الذي سينعكس عن الوجه الخلفي) للصفيحة في الذهاب والإياب ، نحصل من جديد على سهمين باتجاهين متعاكسين ، وبالتالي على سهم حاصل معدوم (شكل ١٥) . لنستمر في زيادة ثخن الصفيحة . نجد عندئذ أن الظروف نفسها تتكرر كلما أصبح المسار الإضافي ، لفوتون الوجه الخلفي ، ذا قيمة تجعل العقرب يدور دورات إضافية كاملة على صفحة المزمان التخيلي .



شكل (١٥)

عندما يكون للزجاج ثخن يجعل العقرب يقوم ، من أجل الانعكاس الخلفي ، بدورة كاملة زيادة عن حال الانعكاس الأمامي ، يصبح للسهمين اتجاهان متعاكسان ؛ فيكون السهم الحصيلة معدوماً ؛ أي أن الانعكاس نحو A يزول تماماً.

إذا كانت الزيادة في المسار تؤدي إلى ربع دورة ، أو ثلاثة أرباع إضافية ، فإن السهمين اللذين نجمعهما يشكلان زاوية قائمة ، فيكون السهم الحصيلة وتر مثلث قائم . ولما كان مربع الوتر يساوي ، بموجب نظرية فيثاغرس ، مجموع مربعي الضلعين القائمتين نجد ، في هذه الحالة ، احتمالاً يساوي فعلاً 8% (4% + 4%) (شكل ١٦) .

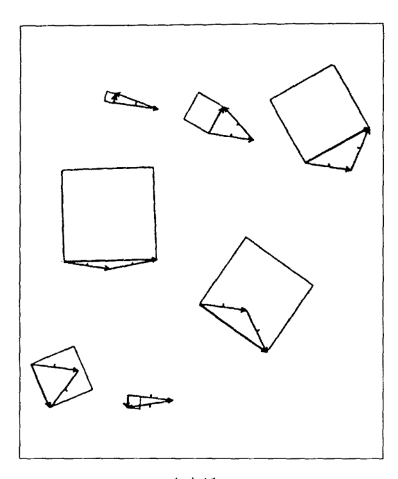


شكل (١٦)

عندما يتعامد سهما الانعكاسين ، الأمامي والخلفي ، يصبح السهم الحصيلة وتراً في مثلث قائم الزاوية ، ويكون مربعه مساوياً مجموع مربعي السهمين (نظرية فيثاغرس) .

لاحظوا أن السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الأمامي لا يتغير اتجاهه من صفيحة لأخرى (بفرض أن المسافة بين هذا الوجه ومنبع الفوتونات ثابتة) مهما كان ثخنها ؛ لكن الذي يتغير هو اتجاه السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الخلفي ، فهو الذي يدور أكثر فأكثر بازدياد ثخن الصفيحة . ومن ذلك ينتج تغير في الزاوية بين السهمين ، وبالتالي تغير في طول السهم الحصيلة ذو صفة دورية بين الصفر و 0.4. فمربع هذا الطول يتغير ، هو الآخر ، بصورة دورية بين الصفر و 16% . وبيت القصيد هو أن هذا بالضبط ما وجدناه في شتى تجاربنا (شكل ١٧) .

وهكذا شرحت لكم كيف نحسب بدقة شتى خصائص الانعكاس الجزئي ، وذلك فقط برسم أسهم صغيرة على ورقة عادية . إن هذه الأسهم تمثل ، باللغة الفنية ، «سَعات احتمال» . وفي هذه العبارة : «حساب سعة احتمال هذا الحادث أو ذاك» ، كثير من الأناقة والجدية ، لكنني أفضل أن أكون أكثر صدقاً معكم فأقول : إننا لم نفعل أكثر من تعيين السهم الذي مربع طوله يمثل احتمال وقوع الحادث المقصود .



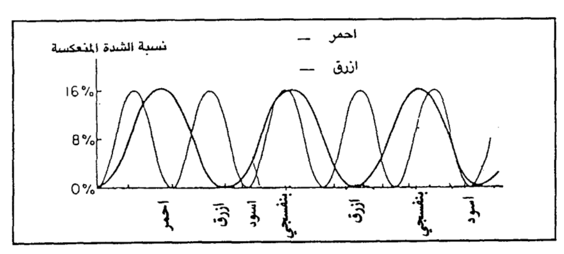
شكل (١٧)

لدى تزايد ثخن الزجاج تتزايد زوايا دوران العقرب الإضافية في حال الانعكاس الخلفي، فتزداد الزاوية بين السهمين ويتغير طول السهم الحصيلة، ويتغير مربع طوله بشكل دوري بين 0 و 16%.

أريد الآن أن أنهي هذه المحاضرة الأولى بالكلام عن ألوان فقاعة الصابون، أو بالأحرى عن الألوان التي ترونها على سطح حومة ماء مُلوَّث بزيت سيارة، حيث من المفروض أن لا نرى سوى بقعة بُنِّية على خلفية موحلة، في حين أننا نرى أشكالاً جميلة ملونة. والواقع أن الغشاء الزيتي الرقيق الممتد على وجه الماء يقوم مقام صفيحتنا الزجاجية الرقيقة. فهذا الغشاء يعكس نسبة معينة من كل ضوء يسقط عليه؛ وهذه النسبة تتفاوت، بحسب ثخن الغشاء، بين الصفر وقيمة عظمى. فإذا وجهنا ضوءاً أحمر صافياً على سطح الغشاء الزيتي نرى بقعاً حمراء تتشكل عليه مفصولة بعصابات سوداء ضيقة (تتعلق إذن بنسبة انعكاس معدومة)؛ وهذا كله ناجم عن أن ثخن الغشاء ليس واحداً في كل مناطقه. وإذا أرسلنا ضوءاً أزرق صافياً على سطح الغشاء نرى بقعاً زرقاء مفصولة بعصابات ضيقة سوداء. فإذا أرسلنا

الآن مزيجاً من الأحمر والأزرق نرى مناطق تعكس بغزارة الضوء الأحمر، وأخرى تعكس بغزارة الضوء الأزرق، بحسب ثخن الغشاء عند نقطة الانعكاس؛ لكننا نرى أيضاً مناطق تعكس الأحمر والأزرق معاً (فتعطي لوناً بنفسجياً)، وأخرى ذات ثخن يطفىء انعكاس الأحمر والأزرق كليهما، فتبدو سوداء إذن.

ولفهم هذه الظاهرة بشكل أحسن يجب أن نعلم أن دورة نسبة الانعكاس (بين الصفر و 16%) تتكرر في حال الأزرق بأكثر مما تتكرر في حال الأحمر. هذا لدرجة أن بعض الثخانات تعكس بغزارة إما الأحمر وإما الأزرق (وإما، اتفاقاً، الأثنين معاً)؛ ومن أجل قيم أخرى للثخن معينة تماماً ينعدم انعكاس أحد اللونين (أو كليهما) (شكل ١٨). ولئن كانت وتيرة تكرار دورة الأزرق أكبر من وتيرة تكرار دورة الأحمر، فما ذلك إلا لأن عقرب المزمان المتعلق بالأزرق يدور بأسرع من عقرب المزمان المتعلق بالأحمر. والحق أن هذا هو الفرق الوحيد بين فوتون أزرق وفوتون أحمر (أو بين أي فوتونين من لونين مختلفين، بما في ذلك الإشعاع السيني والراديوي): إن عقربيهما لا يدوران بسرعة واحدة.



شكل (١٨)

لدى تزايد ثخن الزجاج باستمرار تتغير دورياً نسبة الانعكاس الجزئي عن وجهيه بين 0 و 16%. هذا من أجل ضوء وحيد اللون. ولما كانت سرعة حركة عقرب المزمان التخيلي تختلف من لون لآخر (لكل لون مزمان خاص به) فإن الأدوار المتعلقة بشتى الألوان تتكرر بوتائر مختلفة. فلدي ورود ضوأين صافيين مختلفين في اللون (أحمر وأزرق مثلاً) على صفيحة زجاجية معاً، نحصل، بحسب ثخن الصفيحة في المنطقة المنظور إليها، إما على انعكاس الأحمر وحده، أو على انعكاس الأزرق، أو على انعكاس اللونين معاً بنسبتين مختلفتين (معطين شتى ملامح البنفسجي)، أو أخيراً انطفاء انعكاس اللونين كليهما (نرى منطقة سوداء). وإذا كان ثخن الصفيحة من منطقة لأخرى (كحال بقعة زيت على وجه حومة ماء طيني) نرى كل مزائج هذين اللونين بنسب متفاوتة. وإذا كان الضوء الوارد أبيض (كضوء الشمس) يصبح عدد المزائج المتاحة لا نهائياً فنرى تشكيلة عديدة جداً من الألوان.

إننا نشاهد إذن ، باستخدام مزيج من الضوء الأحمر والضوء الأزرق ، مناطق حمراء وأخرى زرقاء وأخرى بنفسجية محفوفة بمناطق سوداء تفصل فيما بينها. وعندما يسقط ضوء الشمس ، وهو يحوي نوراً فيه الأحمر والأصفر والأخضر والأزرق ، على حومة الماء المكسو بغشاء من الزيت ، فإن المناطق التي تعكس بغزارة كلاً من هذه الألوان تتداخل بعضاً في بعض معطية بذلك تشكيلة غنية بمزائج الألوان التي تراها العين . ولو تفشّت بقعة الزيت على سطح الماء لتغير تفاوت الثخانات بين شتى المناطق ، ولتغير معه توزع تشكيلة الألوان . ومن جهة أخرى لو نظرنا إلى هذه الحومة في الليل ، وهي مضاءة بأحد مصابيح الصوديوم (الصفراء) ، كتلك الموضوعة في أنفاق الطرق الكبرى ، لا نشاهد سوى مناطق صفراء مفصولة بعصابات سوداء (إن لهذه المصابيح خاصية إصدار ضوء من لون واحد) .

إن هذه الظاهرة (الألوان الناجمة عن انعكاس جزئي للون الأبيض عن سطحين متواليين) معروفة باسم التقزح(*) irisation ، ونصادفها في ظروف كثيرة . فلربما كنتم قد تساءلتم من أين تأتي ألوان أجنحة الطيور الطنانة والطواويس . وها انتم الآن تعرفون السبب . ومن جهة أخرى قد يكون من المفيد أن تعرفوا أن هذه الألوان الرائعة هي نتيجة عملية تطور . وعندما نستمتع اليوم بألوان الطواويس يجب أن نعترف بفضل كل تلك السلالات من الإناث ذات الريش الداكن التي برعت في اختيار أزواجها من الذكور . (إن الانسان لم يفعل ، بعدئذ ، أكثر من تحسين الطرائق التي اختارتها الطواويس) .

وإنني أنوي ، في محاضرتي القادمة ، أن أشرح لكم كيف نستطيع ، بجمع تلك الأسهم الصغيرة ، أن نحسب بشكل صحيح ظواهر أخرى مألوفة لديكم ، كانتشار الضوء في خط مستقيم ، وقانون الانعكاس (زاوية الانعكاس تساوي زاوية الورود) ، وتجميع الضوء بوساطة العدسات ، الخ . وسترون أننا نستطيع بتلك الطريقة تفسير كل ما تعرفونه عن الضوء .

(*) من اسم «قوس قزح» ، وهو ظاهرة جوية معروفة ، ناجمة عن مثل هذه الأمور . (المترجم) .

الفصل الثاني

الفوتونات
جسيمات الضوء

الفوتونات: جسيمات الضوء

ها نحن الآن في ثاني محاضرات هذه السلسلة عن الإلكترودیناميك الكمومي. أظن أن أياً منكم لم يكن هنا في المرة السابقة..نظراً لأنني حذّرت أن محاضرة اليوم ستكون عَصِيَّةً على الفهم. ولهذا السبب أبدأ بتذكير موجز لما قلته في محاضرتي الأولى.

لقد تكلمنا عن الضوء. وأول ما يهمني أن تعرفوه هو أن الضوء ينجلي عن مجموعة جسيمات: إذا اسقطنا على كاشف (مضاعف فوتوني) ضوءاً ضعيفاً جداً (وبالتدقيق من لون واحد)، فان هذا الكاشف يُصدر «تكات» ذات شدات متساوية، وتكون أقل تكراراً كلما تناقصت شدة الضوء الوارد.

والشيء المهم الثاني، والذي فصّلتُ فيه الكلام في محاضرتي السابقة، هو حدوث انعكاس جزئي، بنسبة 4% وسطياً، للفوتونات (وحيدة اللون) الواردة على سطح واحد زجاجي. وهذا بحد ذاته ظاهرة غامضة نوعاً ما، لأن من المستحيل أن نتنبأ من هي الفوتونات التي ستنعكس عن ذلك السطح؟ وأيها التي ستتوغل في الزجاج؟ لكن اللغز يستفحل بمجرد أن نفحص ما سيحدث بوجود سطح ثان على طريق الفوتونات: فبدلاً من النسبة 8% التي نتوقعها نلاحظ أن نسبة الانعكاس عن السطحين المتواليين تتفاوت، حسب ثخن الزجاج، بين الصفر و 16%.

لئن أمكن تفسير ظاهرة الانعكاس الجزئي العجيبة هذه، عن سطحين متواليين وفي حال ضوء قوي، في إطار نظرية موجية، فإن هذه النظرية لا تقدم تفسيراً لصدور «تكات» من الكاشف تظل ذات شدة واحدة حتى لو خفضنا تدريجيا من شدة الضوء. لكن الالكتروديناميك الكمومي «يحلُّ» مفارقة هذه المثنوية، موجة / جسيم، في طبيعة الضوء، وذلك بفكرة أن الضوء (كما تنبأ نيوتن) مصنوع من جسيمات، وينطوي هذا التفسير على عودة الفيزياء إلى تبني نظريات سبق لها أن تجاوزتها. وكل ما يمكن حسابه هو احتمال أن يصل الفوتون إلى الكاشف؛ فالفيزياء لا تقدم أي نموذج مرضٍ لتفسير أسلوب حدوث الأشياء في عالم الواقع.

لقد شرحت أيضاً في محاضرتي الأولى كيف يحسب الفيزيائيون احتمال وقوع حادث ما . إنهم يقومون بعملية جمع فنية على أسهم صغيرة يرسمونها على قطعة من الورق . وقواعد هذه اللعبة هي :

ـ **مبدأ أساسي** مفاده أن احتمال وقوع الحادث يتعين بمربع طول سهم ، اسم هذا السهم هو : «سعة الاحتمال» . فالسهم الذي طوله 0.4 مثلاً ، يمثل احتمالاً قيمته 0.16 أو 16%.

ـ **قاعدة عامة** تبين طريقة رسم الأسهم التي تمثل حادثاً يمكن أن يقع بعدة أساليب : يُرسم سهم من أجل كل واحد من هذه الأساليب المتاحة ،تُركب هذه الأسهم (يقال «تُجمع») بطريقة تقضي بـ «تعليق » ذيل كل رسهم برأس السهم الذي سبقه ؛ و«السهم الحصيلة» هو عندئذ السهم الذي يذهب من ذيل السهم الأول إلى رأس السهم الأخير ؛ ومربع طول هذا السهم يمثل احتمال الحادث المقصود .

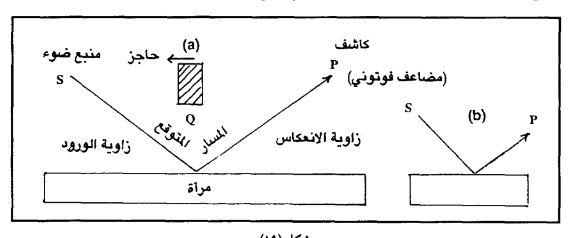
وقد شرحت أيضا ، في محاضرتي الأولى ، عدداً من القواعد تبين طريقة رسم الأسهم المتعلقة بالانعكاس الجزئي عن سطح زجاجي .

كل هذا موجز لما قلته في محاضرتي السابقة .

واليوم أنوي أن أبين لكم كيف تتيح رؤية العالم بهذه الصورة ـ المختلفة عن كل ما تعودتهم عليه ،لدرجة أنكم ربما تتمنون أن لا تعودوا إليها أبداً ـ تفسيراً لكل الخصائص المألوفة في سلوك الضوء : تساوي زاويتي الورود والانعكاس ، انعطاف (إنكسار refraction) مسار الضوء عند نقطة مروره من الهواء إلى الماء ، سير الضوء في خط مستقيم ،تجميع العدسة للضوء الذي يخترقها ، الخ . وتفسر هذه النظرية أيضاً ظواهر ضوئية أخرى قد لا تعرفونها . وبصراحة أقول لكم إنني ، حين تحضير هذه المحاضرات ،لقيت صعوبة كبيرة في مقاومة الرغبة في أن أشرح لكم كيفية العثور على كل خواص الضوء الأولية التي لقي أساتذتكم في التعليم الثانوي عناءاً كبيراً في البرهان عليها ، كالانعراج diffraction مثلاً (أي سلوك الضوء في جوار حافة الظل) . ولما كان معظمكم لم تُتح له فرصة ملاحظة هذه الأشياء بعناية ، فلن أتكلم عنها . لكنني أؤكد لكم (وبدون ذلك تصبح الأمثلة التي سأسوقها خادعة) أن كل الظواهر الضوئية التي نفحصها بالتفصيل يمكن أن تتفسر بمساعدة الإلكترودیناميك الكمومي . ومع ذلك لن أشرح لكم اليوم سوى أبسط الظواهر الضوئية وأكثرها شيوعاً.

لنتأمل إذن ، بادىء ذي بدء ، في مرآة مستوية ولنسأل أنفسنا كيف ينعكس الضوء عنها (شكل ١٩) . لدينا أولاً منبع ضوئي ، s ،يُصدر ضوءاً ذا لون واحد وضعيف الشدة (مانزال نستخدم ضوءاً أحمر) . تخرج الفوتونات فرادى . لدينا في P مضاعف فوتوني (كاشف) يبعد عن المرآة بمسافة بعد المنبع عنها (رسم الأسهم أسهل في هذه الحالة التناظرية) . سنحاول حساب احتمال صدور «تكة» من الكاشف تنبىء عن وصول فوتون إليه من المنبع . ولما كان بإمكان بعض الفوتونات أن تذهب مباشرة من S إلى P ، نضع حاجزاً Q ، يحول دون ذلك .

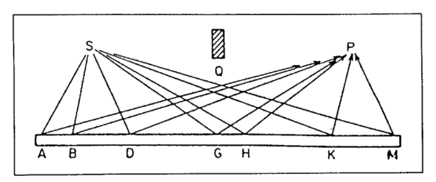
واضح أننا نتوقع عندئذ من الفوتون الذي يبلغ الكاشف أن يكون قد انعكس عن المراة في منطقتها المركزية : فنحن لا نرى في الحق ما يمكن أن يُغري الفوتون ، الذي سينعكس عنها بين S وP ، بالذهاب إلى حافة المرآة .



شكل (١٩)
تقول النظرية القديمة بأن المرآة تعكس الضوء بحيث تتساوى زاويتا الورود والانعكاس ،حتى ولو كان المنبع والكاشف ، كما في (b) ، غير موجودين في سوية واحدة .

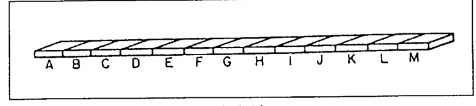
ومع ذلك ، وبالرغم من انطباعنا بأن حافة المرأة لا دخل لها بالانعكاس بين Sو P ، نسأل الإلكتروديناميك الكمومي رأيه في هذا الشأن . لنطبق قاعدة اللعبة : إن احتمال وقوع حادث معين يساوي مربع السهم المحصول عليه بجمع شتى الأسهم المتعلقة بكل الطرق المتاحة . ففي التجارب السابقة ،عندما كنا نقيس نسبة الانعكاس الجزئي عن سطحين ، لم يكن يوجد سوى طريقين متاحين للفوتون كي يذهب من المنبع إلى الكاشف . أما هنا فالطرق المتاحة للفوتون ذات عدد لا نهائي الكبر : لأنه يستطيع ، مثلاً ، أن يبدأ بالذهاب إلى A ، أو إلى B ، عند الحافة اليسرى للمرأة ، ثم ينطلق منها نحو الكاشف (شكل ٢٠) ، وبإمكانه أيضا أن ينزو عن المرأة ، كما نتوقع ، عند G ؛لكنه قادر أيضا على أن يختار الانعكاس في K ، أو في M.

ستقولون لي حتماً إن كل هذا كلام فارغ ، إنني مخطىء ، لأن معظم الطرق التي ذكرتها لا تحقق تساوي زوايتي الانعكاس والورود . كلا ، إنني لست مخطئاً بل إن هذا هو سلوك الضوء فعلاً! أما كيف يتم ذلك فإليكم شرحه .



شكل (٢٠)
تقول النظرية الكمومية بأن الضوء ينعكس عن كل أجزاء المرآة ، بين A و M ، بسعة إحتمال واحدة .

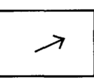
لكي أجعل الأمور أسهل على الفهم أفترض أن المرآة تتألف ، بكل بساطة ، من عصابة طويلة ضيقة تذهب من اليسار إلى اليمين (أي أنني أهمل ، في الوقت الحاضر ، أن المرآة ذات امتداد آخر عمودي على مستوى الورقة ، شكل (٢١) . ورغم أن الضوء يستطيع في الواقع أن ينعكس عن عدد لا نهائي من المناطق على هذه العصابة ، سأقوم بعملية تقريبية تقضي أن أُقسِّم المرآة إلى عدد لا متناه من المستطيلات الصغيرة وأن أعتبر أن كل واحد من هذه المستطيلات يتعلق بمسار واحد متاح للضوء (إن الحساب يصبح أكثر فأكثر دقة ، لكن أكثر فأكثر طولاً ، كلما كانت مساحات المستطيلات صغيرة ، مما يزيد في عدد المسارات المتاحة) .



شكل (٢١)
لتسهيل الحساب نكتفي ، من سطح المرآة ، بعصابة ضيقة وطويلة نقسمها إلى مستطيلات صغيرة يُعيّن كل منها طريقاً متاحا للضوء ، إن هذا التبسيط لا ينال من دقة عملية البحث عن الطريق الذي يسلكه الضوء .

والآن يجب أن أرسم سهماً من أجل كل مسار للضوء متاح . إن كل واحد من هذه الأسهم يتميز باتجاهه وطوله . سأعالج أولاً مسألة الطول . قد تتوقعون ، لأول وهلة ، أن يكون السهم المتعلق بالمسار المار بمنتصف المرآة ، G ، أطول بكثير من الأسهم الأخرى

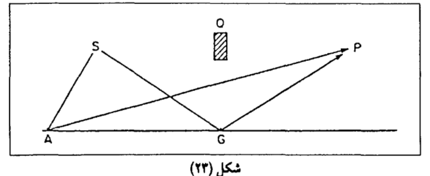
(لأنكم تعتقدون أن احتمال أن يسلك الضوء هذا الطريق أكبر بكثير من احتمال أن يسلك أي طريق آخر) . ولكن كلا! فنحن لا نملك الحق في فرض هذه القاعدة الاضافية والواقع أبسط من ذلك بكثير : إن احتمال أن يسلك الفوتون أي طريق ، للذهاب إلى الكاشف ، يساوي عملياً احتمال أن يسلك أي طريق آخر . وعلى هذا ما علينا أن نرسم سوى أسهم ذات طول واحد عملياً ، (الواقع أن من الواجب تصحيح ذلك ، لأن المسافات والزوايا متفاوتة قليلاً من طريق لآخر ، لكنني أهمل هذا التصحيح لأنه صغير الشأن جداً) . لنمنح إذن طولاً اختياريا مشتركاً لكل هذه الأسهم ، وسأختار طولا صغيراً جداً لأن علي أن أجمع عدداً كبيرا جداً من الأسهم (شكل ٢٢) .



شكل (٢٢)

نعلّق بكل طريق متاح للضوء سلوكه سهماً ذا طول معين نختاره .

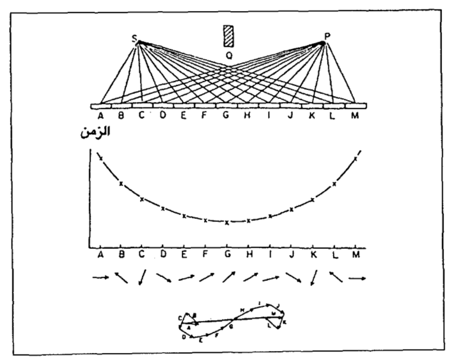
لئن كنا نستطيع ، دون مجازفة كبيرة ، أن نرسم أسهماً كلها ذات طول واحد ، فإن عملية اختيار اتجاهاتها المتوالية تتطلب كثيراً من الحيطة ، لأن الطرق المختلفة لا تستغرق زمناً واحداً (تذكروا ما قلناه في المحاضرة السابقة : إن اتجاه كل سهم يتعين باتجاه عقرب مزمان تخيلي يقيس الزمن الذي يستغرقه الضوء في كل طريق) . وواضح أن الفوتون الذي يذهب إلى A ، عند حافة المرآة ، قبل أن ينعكس نحو الكاشف ، يستغرق زمناً أطول مما يستغرق الفوتون الذي يمر بـ G (شكل ٢٣) . تصوروا للحظة أنكم مستعجلون جداً وتريدون أن تذهبوا من المنبع إلى المرآة ، ثم من المرآة إلى الكاشف . فإذا فكرتم قليلاً سترون أن الاندفاع دون تفكير نحو A ليس فكرة حسنة ، ذلك أن ما يبقى عليكم أن تقطعوه بعد A إلى P طريق أطول بكثير ، وأن من الأجدى بكثير أن تمروا بمنتصف المرآة .



شكل (٢٣)

لكل الأسهم طول واحد (بتقريب أولي) ، أما اتجاهاتها فتختلف كثيراً فيما بينها ، لأن زمن سير الضوء يتعلق كثيراً بالطريق المسلوك . فالطريق P A S مثلاً أطول بكثير من الطريق P G S.

إن تعيين اتجاه كل سهم يسهل كثيراً إذا رسمتُ ، تحت المرآة مباشرة (شكل ٢٤) مخططاً يمثل ، عند شاقول كل نقطة من المرآة ، الزمن الذي يستغرقه الفوتون المار بتلك النقطة . أحمل هذه الأزمنة على محور شاقولي : كلما كان الزمن الذي يستغرقه الضوء كبيراً ، كانت النقطة الممثلة له على مخططي الثاني ذات موقع أعلى .



شكل (٢٤)

إن كل واحد من الطرق المتاح للضوء سلوكها (آخذين في الحسبان التبسيطات التي ذكرناها) مرسوم في المخطط الأعلى . وفي المخطط الأوسط حملنا على شاقول كل نقطة من نقاط المرآة الزمن الذي يستغرقه الضوء المنعكس عندها في اثناء ذهابه من S إلى P . وتحت المخطط الأوسط رسمنا الأسهم المتعلقة بكل تلك الطرق ثم ، في الأسفل ، جمعنا كل هذه الأسهم ورسمنا السهم الحصيلة لها كلها . وهنا نري بكل وضوح أن الأسهم التي تسهم بأقساط وافرة في هذه الحصيلة هي تلك التي تتعلق بالطرق المارة بالنقاط المحصورة بين E و J . وهذا ناجم عن أن هذه الأسهم لها كلها اتجاه واحد عملياً وأنها، بالتالي ، ناجمة عن طرق ذات أزمنة شبه متساوية . وبمقدار ما نرى من أن هذه الطرق تجاور الطريق ذا الزمن الأصغري يمكن أن نقول ، بتقريب أولي ، إن الطريق الذي يحب الضوء سلوكه هو ذلك الذي يستغرقه فيه «أقصر زمن» ممكن .

لنبدأ بالنقط الموجودة قرب الحافة اليسرى للمرآة ، مثل A . إن الزمن الذي يستغرقه الضوء المار بـ A ، للذهاب من S إلى P ، طويل نسبياً ، مما يعني أن النقطة الممثلة له ، على مخططي الثاني ، تقع عاليا على شاقول A . وكلما اقتربنا من مركز المرآة يتناقص الزمن الذي يستغرقه الضوء مروراً بالنقطة المعتبرة ، وتنزل بالتدريج النقاط الممثلة لهذه الأزمنة نحو الأسفل على شاقولات نقاط المرآة . لكن بمجرد أن نتجاوز مركز المرآة تأخذ الأزمنة بالتزايد والنقاط الممثّلة بالصعود على شاقولات

نقاط المرور بالمرآة . فاذا وصلنا الآن النقاط الممثلة للأزمنة بخط مستمر نحصل على منحن متناظر بالنسبة لشاقول المنتصف G ، يبدأ بالنزول ثم يأخذ بالصعود .

والآن ماذا يمكن أن نستتنتج بخصوص اتجاهات الأسهم؟ إن اتجاه كل سهم يتعين بالزمن الذي يستغرقه الفوتون للذهاب من S إلى P متبعاً الطريق الذي يتعلق به هذا السهم . لنرسم إذن هذه الأسهم بدءاً من اليسار . فبالنقطة A يتعلق زمن سير على الطريق P AS ، وبالتالي اتجاه ما (شكل ٢٤ المخطط الصغير في أسفله) للسهم الذي يتعلق به . وللسهم المتعلق بالنقطة B اتجاه آخر ، لأن زمن السير على PBS مختلف عن سابقة . لكن الأسهم المتعلقة بنقط مرور بالمرآة قريبة من المركز ، مثل F و G و H ،فذات اتجاه واحد تقريبا لأن أزمنة الطرق المارة بها تكاد تكون متساوية . وبمجرد أن نتجاوز مركز المرآة نرى أن كل طريق على اليمين يساوي طريقا آخر مناظراً له على اليسار (هذا يعود إلى أننا اخترنا منذ البدء وضع تناظر يتساوى فيه بعدا المنبع والكاشف عن المرآة) . فنرى مثلا ، أن الطريقين PIS و PDS متساويان . فيتعلق بهما سهمان لهما اتجاه واحد .

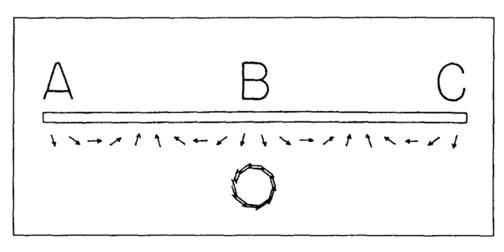
علينا الآن أن نجمع كل هذه الأسهم (شكل ٤٢ ، في الأسفل) . ولأجل ذلك نعلق بالتوالي ذيل كل سهم برأس سابقه بادئين بـ A . تصوروا أن عليكم أن تنجزوا جولة على مراحل ، سهماً بعد سهم . من المؤكد أنكم ، في بدء الرحلة ، لا تتقدمون كثيراً ، لأن الاتجاه يتغير كثيراً من مرحلة الأخرى . ولا يصبح هذا التقدم كبيراً إلا عندما تصبح الأسهم ذات اتجاه واحد تقريباً ، ثم في المراحل الأخيرة ، عندما تصبح الأسهم من جديد متخالفة كثيراً ، تعودون الى الدوران في مكان واحد تقريباً دون تقدم يذكر . ماعلينا ، أخيراً ،سوى أن نرسم السهم الحصيلة ، من ذيل السهم الأول إلى رأس السهم الأخير . انظروا الآن إذا كنا قد تقدمنا كثيرا ،نعم ، لأنكم ترون أن السهم الحصيلة ذو طول محسوس (شكل ٤٢ ، في الأسفل) . أي ، بفصيح العبارة ، أن الإلكتروديناميك الكمومي ينبىء فعلاً أن الضوء ينعكس عن المرآة! .

لنحاول الآن فهم ما يحدث . ما الذي يتحكم في طول السهم الحصيلة؟ نلاحظ أولا أن طرفي المرآة ليس لهما في هذا الأمر شأن كبير ، لأن الأسهم المتعلقة بهما ليست ذات أهمية تذكر ، أي أننا لو أسقطنا طرفي المرآة لن نخسر شيئا يذكر في الحصيلة (لقد كنتم تتوقعون منذ البدء أنني أهدر وقتي بالاهتمام بالطرق التي تمر قرب طرفي المرآة) .

فما هو إذن ، في هذه الظروف ، الجزء المهم من المرآة ، أي الجزء الذي يُسهم بنصيب الأسد في طول السهم الحصيلة؟ إنه ، بكل وضوح ، الجزء الذي يُقدم أسهماً ذات اتجاه واحد تقريبا ، لأن الزمن الذي يستغرقه الضوء على الطرق المتعلقة بها يكاد يكون واحداً من أجلها كلها . فإذا عدنا الآن إلى مخطط الشكل ٤٢ (قسمه الأوسط) ، الذي يمثل التغيرات الزمنية من طريق لآخر ، نرى أن هذا الزمن ذو قيمة واحدة عملياً في منطقة المنحنى القريبة من النهاية الصغرى ، أي حيث الزمن أصغري . وباختصار نقول : إن المنطقة المرآتية التي تجعل زمن مسار الضوء أصغرياً هي أيضاً المنطقة التي تجعل زمن المسار غير متغير من طريق لآخر يمران بها ؛ إنها المنطقة التي تجعل احتمال أن ينعكس الفوتون عنها كبيراً . وذلك هو السبب الذي يبيح لنا أن نكتفي بهذه الصورة التقريبية للعالم ، التي تقضي بأن يسلك الضوء الطريق الذي يستغرق عليه زمناً أصغريا (طريق «الزمن الأصغري») ، ويُبرهن عندئذ بسهولة على أن الطريق ذا الزمن الأصغري يحقق تساوي زاويتي الورود والانعكاس ، ولن أسوق لكم البرهان لضيق الوقت .

هكذا إذن يقدم لنا الإلكتروديناميك الكمومي الجواب الصحيح : إن وسط المرآة هو الذي يعطي جوهر الانعكاس ؛ لكن بلوغ هذه النتيجة اقتضى أن نفترض أن الضوء ينعكس عن كل نقاط سطح المرآة ، وقد اضطررنا إلى «جمع» عدد كبير من الأسهم تلغي في غالبيتها بعضها بعضاً . وإذا بدا لكم كل ذلك أمراً مشكوكاً في جدواه ، أو مجرد عبث رياضي ، فإن فكرة وجود «كائنات» كل وظيفتها هي أن يعدم بعضها بعضا ، تبدو ، بعد كل شيء ، فكرة غير ذات سمات «فيزيائية» كثيرة .

سنضع الآن على المحك مفهوم انعكاس يحدث على كل سطح المرآة ، وذلك بالتجربة التالية . نبدأ بحذف ثلاثة أرباع المرآة ولا نحتفظ إلا بربعها الأيسر ، فيبقى لدينا مرآة ذات مساحة لا بأس بها ، والفرق الوحيد هو أن هذه المرآة ليست «في المكان المناسب» . كانت الأسهم المتعلقة بالقسم الأيسر من المرآة ، في التجربة ، ذات اتجاهات متخالفة كثيراً فيما بينها بسبب الفروق الكبيرة بين شتى الأزمنة اللازمة للسير على الطرق المارة بهذا القسم الأيسر (شكل ٢٤) ، حتى ولو كانت هذه الطرق متجاورة . عليَّ هنا أن أُجري حسابا أكثر دقة ، ولأجل ذلك أُقسِّم هذا الجزء الأيسر من المرآة إلى مناطق أصغر بكثير ، وبذلك يصبح الفرق بين زمني طريقين متجاورين أصغر بكثير مما كان (شكل ٢٥) . ندرك عندئذ بسهولة أننا نحصل على أسهم يتجه ،



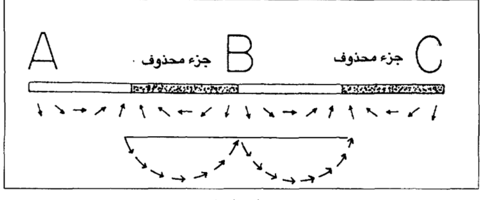
شكل (٢٥)

لكي نضع في الامتحان فكرة أن الانعكاس يحدث أيضا عند حافات المرآة (رغم أن شتى هذه الإسهامات تتفانى بالجمع بعضاً ببعض) نجبر الضوء على الانعكاس عن مرآة غير موجودة في «المكان الجيد» (بالنسبة لموقعي المنبع S والكاشف P) . نقسم هذه المرآة إلى مستطيلات أصغر بكثير من ذي قبل (كما في الشكل ٢١) بحيث لا يتغير زمن المسير إلا قليلاً جداً من طريق لآخر مجاور . عندها نجد أن الأسهم ترسم ، في أثناء جمعها ، دورة مغلقة ، مما يجعل السهم الحصيلة شبه معدوم .

إجمالياً ، بعضها نحو اليسار وبعضها الآخر نحو اليمين . ولدى جمع هذه الأسهم كلها بالطريقة المعهودة نحصل على مضلع يشبه الدائرة ، أي أننا إذا قمنا بجولة على متوالية هذه الأسهم نجد أننا ندور ، بكل بساطة ، في حلقة مفرغة ، دون تقدم .

لكن لنفترض الآن أننا حككنا بعناية السطوح العاكسة للمناطق التي أعطت الأسهم المائلة إجماليا نحو اليسار مثلاً . لن يبقى عندئذ لدينا سوى الأسهم المتجهة إجمالياً نحو اليمين (شكل ٢٦) . وإذا جمعنا هذه الأسهم كلها نحصل على شكل هندسي ذي سلسلة من المنخفضات ، وبالتالي على سهم حصيلة ذي طول غير معدوم . وتقول النظرية إننا لابد أن نحصل عندئذ على انعكاس شديد ، والمرآة المصنوعة بهذا الشكل هي ما يسمى شبكة انعراج (وهي تعمل على ما يُرام) . أليست هذه الشبكة مرآة سحرية؟ لقد انطلقتُ من مرآة موضوعة في ظروف انعكاس معدوم ، حككتُ مناطق من سطحها ، فأصبحت عاكسة تماماً(*)!

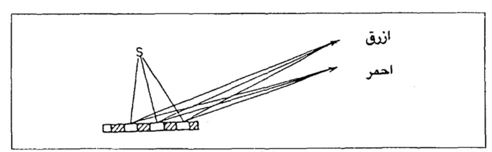
(*) إن المناطق المتعلقة بأسهم متجهة إجماليا نحو اليسار تعطي أيضاً انعكاساً شديدا (لو أسقطنا المناطق المتعلقة بأسهم تميل نحو اليمين) . ولا يحدث أن يتفانى مفعولا هذين النوعين من الأسهم ، النوع المائل نحو اليمين والنوع المائل نحو اليسار ، إلا إذا بقيت المناطق المتعلقة بهما ، كليهما ، عاكسة (غير محكوكة) . والحال هنا تشبه تماما حال الانعكاس الجزئي عن سطحين : ففي حين يعكس كل سطح منهما الضوء ، يحدث أن يكون السهمان المتعلقان بهما من اتجاهين متعاكسين فيتفانيان ، وذلك حين يكون ثخن الصفيحة مناسباً لهذا التضاد في اتجاهي السهمين فيعدم أحد الانعكاسين الانعكاس الآخر .



شكل (٢٦)

إذا لم نجمع ، من أسهم الشكل السابق ، سوى تلك التي لها ميل واحد تقريباً ،نحو اليمين مثلاً (كما هنا) ، أو نحو اليسار ، وذلك بعد إسقاط تلك التي تميل نحو الإتجاه الآخر (كأن نحكٌ السطح العاكس عند الأجزاء التي نريد حذف أسهمها) ، نحصل على انعكاس إجمالي لا يمكن إهماله ، رغم أن المرآة ماتزال في غير «المكان الجيد» . إن المرآة التي حفرنا فيها خدوشاً ضيقة جداً ومتراصة تسمى : «شبكة انعراج» .

لكن شبكة الانعراج التي أتيت على صنعها لا تعمل هكذا إلا بالضوء الأحمر . فاذا أردت الحصول على الشيء نفسه بضوء أزرق ، يجب عليَّ أن أصنع شبكة أخرى تكون المسافات بين مناطقها المحكوكة أقصر . وذلك ، كما ذكرت في محاضرتي الأولى ، لأن عقرب مزمان الفوتونات الزرقاء يدور بأسرع من عقرب مزمان الفوتونات الحمراء . فلابد إذن من أن تكون أماكن المناطق المحكوكة ، التي تحسب من أجل الأزرق ، منزاحة بالنسبة للمناطق التي حُسبت من أجل الأحمر . وفي الأجزاء العاكسة الباقية لا تكون الأسهم «الزرقاء» كلها من اتجاه واحد، فالشبكة التي تصلح تماماً للأحمر لا تعمل جيداً في حال الأزرق . ومع ذلك يمكن أن نجعل الشبكة المصنوعة للأحمر تعمل أيضاً في حال استخدام ضوء أزرق ، وذلك شرط أن نضع الكاشف وفق زاوية مختلفة عن زاوية الأحمر ، وهذا ناجم عن مصادفة سعيدة ذات علاقة بهندسة المسألة (شكل ٢٧) .



(شكل ٢٧)

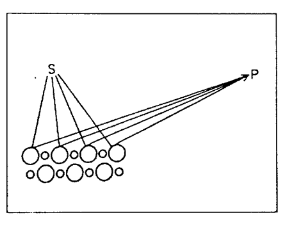
إن شبكة الإنعراج ذات الخدوش التي تلائم فواصلها الضوء الأحمر يمكن أيضا أن تعمل بأضواء من ألوان أخرى شرط أن ننقل الكاشف إلى موقع آخر ملائم ، ذلك هو السبب الذي يجعلنا نرى علي سطح ذي خدوش (كسطح أسطوانات الموسيقى) ألواناً تتغير بتغير زاوية النظر إلى السطح .

لنتخيل الآن أننا اسقطنا ضوءاً أبيض على شبكة انعراج . عندئذ يرتد الأحمر باتجاه ما ، والبرتقالي باتجاه مختلف قليلا ، وهكذا يلي الأصفر فالأخضر فالأزرق ، وباختصار كل ألوان قوس قزح . وبصورة عامة يكون من شأن كل سطح حفرنا فيه خطوطاً متوازية متراصة جداً أن يولّد شتى الألوان عندما يضاء بضوء أبيض ويُمال ميلاً مناسباً : ونرى هذه الظاهرة بسهولة على قرص «الأسطوانة» الموسيقية . وربما كنتم قد صادفتم هذا النوع من الظواهر على هياكل السيارات وهي تمر بكم ؛ ففي أثناء حركتها تلاحظون ألواناً لماعة جداً تتوالى من الأحمر إلى الأزرق . فها أنتم الآن تعرفون كيف تنشأ هذه الألوان : الواقع أنكم ترون شبكة تتشكل من خدوش في الدهان ناعمة مفصولة فيما بينها بمسافات تناسب الأوضاع المتوالية لأعينكم (وهي الكاشف) وللشمس (وهي المنبع الأبيض) . أستطيع أيضاً أن أشرح لكم كيف تعمل الليزرات Lasers والهولوغرامات Holograms (أجهزة تشكل للأشياء خيالات مجسمة واقفة في الفضاء) ، لكنني أعتقد أن الجميع هنا لم يشاهدوا هولوغراماً قط . وعليَّ ، من جهة أخرى أن أتحدث عن ظواهر كثيرة جداً، ولابد من اختيار الأهم مما يتسع له الوقت(*).

إن وجود شبكات الانعراج يُثبت إذن أننا لا نستطيع تجاهل الأجزاء التي تبدو غير عاكسة . فنحن قد برهنا ، بفضل تعديلات طفيفة مناسبة على سطح المرآة ، على أن الانعكاسات عن هذه الأجزاء حقيقية بالفعل وأنها حجر الأساس في بعض الظواهر الغريبة .

لكن الأهم من ذلك أن تبيان واقعية الانعكاس بسطح المرآة كله يُبرز وجود

(*) ومع ذلك لاأقاوم المتعة في أن أتكلم عن تلك الشبكات التي تصنعها الطبيعة ، أي بلورات الملح . فذرات الكلور والصوديوم تشكل فيها طبقات ذات فواصل متساوية ، وهي بمجموعها تلعب دور شبكة انعراج (كالخدوش المحفورة على سطح) ، شريطة أن نرسل عليها الضوء ذا اللون المناسب (هنا أشعة سينية) . ويستطيع الكاشف ، إذا اتخذ أوضاعا معينة ، أن يلتقط كل الضوء المرتد عن طائفة كاملة من تلك الانعكاسات الخاصة (وتوصف هنا بلغة الانعراج) ، وبمعرفة هذه الأوضاع نستنتج المسافة بين طبقتين من البلورة ، وبالتالي المسافة بين الذرات (شكل ٢٨) . وهذه طريقة أنيقة لتعيين البنية الذرية للبلورات ، وفي الوقت نفسه تتأكد الهوية الطبيعية للضوء وللأشعة السينية . وقد تم تنفيذ هذه التجربة عام ١٩١٤ ، وكانت أول مرة «رُئي» فيها تنضيد الذرات في البلورات .



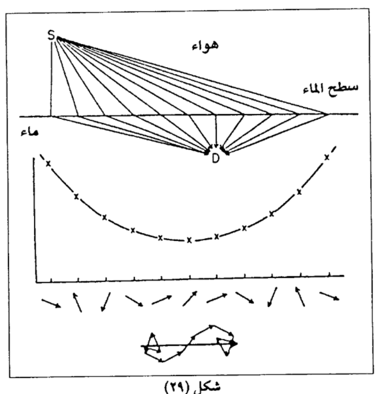
شكل (٢٨)

لقد صنعت الطبيعة عدة شبكات انعراج هي المواد المتبلورة . فبلورة الملح تعكس الأشعة السينية (وهي ضوء يتحرك عقرب مزمانه بسرعة تساوي قرابة 10000 ضعف من تلك المتعلقة بالضوء المرئي) . ومن هذا يستنبط الفيزيائيون المواقع الصحيحة للذرات في البلورة .

سعة (سهم) تتعلق بكل أسلوب من الأساليب المحتملة لوقوع الحادث . وحساب احتمال حادث ما يتضمن ، كي نقوم بعملية الجمع السهمي ، أن نعرف الأسهم المتعلقة بكل الأساليب التي بموجبها يمكن للحادث المقصود أن يقع (وليس فقط الأسهم المتعلقة بالأساليب التي تبدو مهمة) .

وبعد هذا كله ، أريد الآن أن أحدثكم عن شيء مألوف لكم أكثر من الشبكات ، أقصد ما يحدث عندما يمر الضوء من الهواء إلى الماء . سنضع المضاعف الفوتوني ، هذه المرة ، في الماء (نفترض أن المجرب سيجد طريقة لتنفيذ ذلك) . المنبع S في الهواء (شكل ٢٩) ، والكاشف D غاطس في الماء . ومرة أخرى نستهدف حساب احتمال أن يذهب فوتون من المنبع إلى الكاشف . لأجل ذلك علينا أن نأخذ في الحسبان كل الطرق المتاحة للضوء . إن كل طريق منها يعطي سهماً صغيراً ؛ وكما في التجربة السابقة يكون لكل الأسهم طول واحد عملياً . وهنا أيضا سنرسم المنحني الذي يصل بين النقط الممثلة لأزمنة السير على كل الطرق . إن هذا المنحني يشبه تماماً ذلك الذي حصلنا عليه في حال الإنعكاس عن مرآة ، فهو ينطلق من الأعلى ، ينزل حتى يبلغ نهاية صغرى ، ثم يصعد إلى علو نقطة الإنطلاق . والإسهامات الهامة ، في السهم الحصيلة ، تأتي من مناطق سطح الماء التي تقود إلى أسهم كلها ذات اتجاه واحد تقريباً (يكون زمن السير عندئذ واحداً ، عملياً ، على مسارين

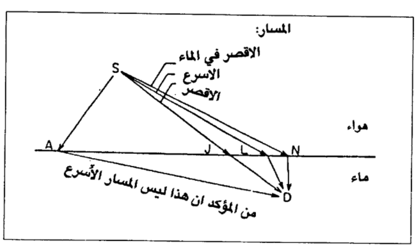
متجاورين) ، أي من المنطقة المقابلة لنهاية المنحني الصغرى . ولما كانت هذه النهاية الصغرى تتعلق بزمن أصغري ، لا يبقى علينا سوى أن نجد الطريق ذا الزمن الأصغري .



شكل (٢٩)

تقول النظرية الكمومية بأن الضوء يمكن أن يسلك عدة طرق للذهاب من منبع في الهواء إلى كاشف في الماء . وباعتماد التبسيطات التي اعتمدناها في حال الانعكاس عن مرآة ، نرسم المنحني الممثل لتغير أزمنة المسير بتغير الطرق ، ثم نرسم (في الأسفل) الأسهم المتعلقة بهذه الطرق ، ثم نجمعها فنرى أن الإسهام الرئيسي في السهم الحصيلة ناجم ، هنا أيضاً ، عن الطرق التي تعطي أسهماً لها اتجاه واحد تقريبا ، وهذه الطرق تتعلق بأزمنة مسير شبه متساوية . ومرة أخرى ، تقع هذه الطرق في جوار الطريق ذي الزمن الأصغري .

الواقع أن الضوء يسير في الماء بأبطأ من سيره في الهواء (سأشرح لكم السبب في محاضرتي القادمة) ، وعلى هذا يستغرق في الماء زمناً أطول . ومن السهل أن نبحث في هذه الظروف عن الطريق ذي الزمن الأصغري . تصور أنك مدرِّب في السباحة ، وقد أوكلت إليك قضية الأمان على الشاطىء . أنت في S ، وفجأة ترى فتاة جميلة مشرفة على الغرق في D (شكل ٣٠) . فكيف تفعل لإنقاذها بالعجل ، علماً أنك تركض على الرمل بأسرع مما تسبح في الماء؟ .



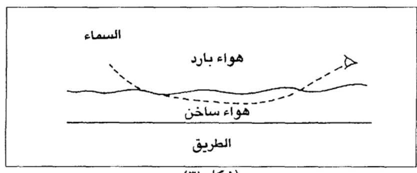
شكل (٣٠)

إن العثور على الطريق ذي الزمن الأصغري للضوء يعود إلى تعيين الطريق الذي يتيح للسباح المنقذ الجالس قرب الشاطىء ، أن ينجد بأسرع ما يمكن فتاة مشرفة على الغرق . إن الطريق الأقصر يجبر على سباحة طويلة الزمن ، كما أن الطريق ذا الطول الأقصر في الماء يجبر المنقذ على الركض زمناً طويلا على الرمل . أما الطريق ذو الزمن الأصغري فهو طريق وسط بين الاثنين .

تعود هذه المسألة إلى تعيين نقطة الدخول في الماء بما يضمن أن تصل بأبكر ما يمكن إلى المسكينة المشرفة على الغرق . واضح أنك لن تفكر في أن تهرع إلى النقطة A لتسبح بعدئذ كالمجنون من A إلى D .فهل يجب أن تتجه في خط مستقيم نحو المنكوبة ، أي أن تدخل في الماء من النقطة J؟ كلا ليس هذا الطريق أيضاً بالطريق الذي يأخذ منك زمناً أصغرياً .كما لا أتصور أن المنقذ سينتظر حتى يحسب الطريق ذا الزمن الأصغري قبل أن يهب لنجدة الفتاة . أما نحن فنستطيع أن نحسب نقطة الدخول في الماء كي يكون الطريق من S إلى D ذا زمن أصغري . فهذا الطريق لابد أن يكون طريقا وسطاً بين الخط المستقيم (المار بـ J) والخط الذي يحوي أصغر مسافة في الماء (المار بـ N) . وهذا أيضاً شأن الضوء : إنه يسلك الطريق ذا الزمن الأصغري ، ذلك الذي يجعله يدخل في الماء عند نقطة ، ولنقل L ، واقعة بين J و N.

أودُّ الآن أن أحدثكم سريعاً عن ظاهرة ضوئية أخرى : السراب . لاشك أنكم قد رأيتم قبل الآن ، وأنتم في سيارة تسير على طريق سخَّنته الشمس كثيراً ، مناطق من الطرق تبدو وكأنها حومات ماء . الواقع أن ما ترونه ليس سوى السماء . لكنكم اعتدتم ، عندما ترون صورة السماء على الطريق ، على أن السبب هو وجود الماء (يحدث عندئذ انعكاس جزئي للضوء عن سطح واحد) . فكيف نفسر ، في تلك الظروف ، أن نستطيع رؤية صورة السماء والماء غير موجود؟ إن هذا ممكن بمجرد أن نعلم أن الضوء يسير في الهواء البارد بأبطأ من سيره في الهواء الساخن . ولكي يُرى

السراب يجب أن يكون الناظر في منطقة من الهواء الأبرد أعلى من طبقة الهواء الساخن بتماس الطريق (شكل ٣١) . يصبح عندئذ من السهل أن نفسر لماذا تُرى السماء عندما ننظر نحو الأرض لا في الهواء : يكفي أن نعيِّن طريق الضوء ذا الزمن الأصغري . وليس هذا بالأمر الصعب ، ولذلك أتركه لتعملوه في بيوتكم ، سترون أن فيه تسلية مثيرة .



(شكل ٣١)

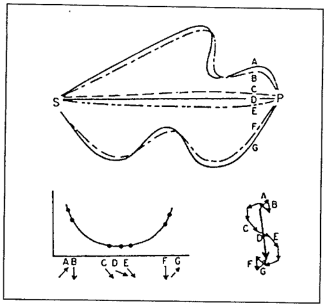
إن تعيين الطريق ذي الزمن الأصغري يتيح فهم ظواهر السراب ، فالضوء أسرع سيراً في الهواء الساخن منه في الهواء البارد . ونحن نرى السماء تظهر أمامنا على طريق السيارة لأن الضوء القادم من السماء يصل إلى عين الناظر وكأنه قادم من أرض الطريق . ولما كانت المناسبات التي نرى فيها السماء ونحن ننظر نحو الأسفل هي تلك التي نتعرض لها عند وجود حومة ماء ، نظن أن الطريق أمامنا مكسو بالماء . . وما ذلك إلا سراب . .

في المثالين اللذين أتيت على تفصيلهما ،سواء في الانعكاس عن المرآة أو في مرور الضوء من الهواء إلى الماء ، افترضتُ للتبسيط أن الضوء يتألف من قسمين مستقيمين بينهما زاوية . لكن ليس من الضروري أن نفترض أن الضوء ، في وسط متجانس ، يذهب في خط مستقيم ، لكن هذا واقع يمكن أن نفسره أيضا بموجب القاعدة العامة في النظرية الكمومية (تلك التي تقول بأن احتمال وقوع الحادث نحصل عليه من جمع الأسهم المتعلقة بكل الأساليب التي تتيح لهذا الحادث أن يقع) .

ولهذا السبب ، وكمثال آخر ، سأبين لكم ، بجمع الأسهم ، كيف يتضح أن الضوء يسير في خط مستقيم . ليكن إذن المنبع S والمضاعف الفوتوني P (شكل ٣٢) . ولنفحص كل الخيارات المتاحة للضوء كي يذهب من المنبع إلى الكاشف ؛ أقول فعلاً كل الخيارات ، بما فيها أغربها . ولما كنا قد تعلمنا درسنا جيداً ، نعلم وجوب أن نرسم كل الأسهم المتعلقة بكل تلك الخيارات .

فمن أجل كل طريق متعرج ، مثل A ، نستطيع إيجاد طريق مجاور جداً له يكون مباشراً أكثر بقليل ، وبالتالي ذا زمن أقصر . لكن الزمن على طريق شبه مباشر ، مثل C ، لا يختلف إلا قليلاً جداً عن طريق أكثر مباشرة منه . ففي هذه

المنطقة إذن نحصل على الأسهم الأكثر جدوى لدى جمعها، وفيها إذن يقع المسار الذي يسلكه الضوء.



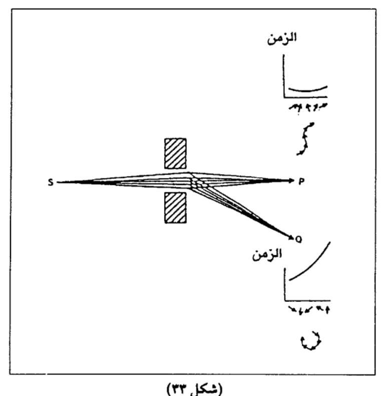
(شكل ٣٢)

تتيح النظرية الكمومية تفسير سير الضوء في خطم مستقيم. نفحص كل المسارات المتاحة. ففي جوار طريق أعوج يوجد طريق أقصر منه، وبالتالي «أسرع» وبه يتعلق سهم ذو اتجاه مختلف. إن الطرق المجاورة للخط المستقيم، D، هي التي لها أسهم ذات اتجاه واحد تقريباً، لأنها تتعلق بأزمنة سير شبه متساوية. فهذه الأسهم وحدها هي التي تسهم بأكبر الأقساط في السهم الحصيلة.

يجب أن نعرف هنا أن السهم الوحيد المتعلق بالطريق المستقيم، على طول D (شكل ٣٢)، لا يكفي وحده لحساب احتمال ذهاب الضوء من المنبع إلى الكاشف. ذلك أن الطرق المجاورة له، مثل C و E، تسهم هي الأخرى إسهاماً كبيراً في قيمة هذا الاحتمال. وهذا معناه أن الضوء، في الحقيقة، لا يسير في خط مستقيم فقط، بل إنه، بتعبير مجازي، «يشتم» الطرق المجاورة، إنه يحتاج إلى منطقة صغيرة من الفضاء تحيط، «كأنبوب» ضيق، بالطريق المستقيم. وكذلك الحال أيضا في الانعكاس؛ فلكي ينعكس الضوء يجب أن تكون المرآة ذات مساحة معقولة؛ إذ لو كان سطحها صغيراً جداً، أصغر من مقطع الأنبوب الذي تحتله الطرق المتجاورة مباشرة، لتناثر الضوء في كل الاتجاهات، مهما كان الموقع الذي نضع فيه المرآة.

سأفحص الآن عن كثب بنية هذا «الأنبوب» الضيق. ولأجل ذلك أضع، بين المنبع S والكاشف P، لبنتين غير شفافتين وظيفتهما أن تمنعا الضوء من أن يذهب «للنزهة» في مكان بعيد (شكل ٣٣)؛ ثم أضع كاشفاً آخر Q وأفترض، لتبسيط

الأمور أيضاً ، أن الضوء لا يستطيع الذهاب من S إلى Q إلا على طرق يتألف كل منها من قطعتين مستقيمتين فقط . فماذا يحدث عندئذ؟ إليكم الجواب : عندما تكون الفتحة بين اللبنتين واسعة بما يكفي لاحتواء طرق كثيرة ذاهبة من S الى P أو من S إلى Q ،نجد أن الأسهم المتعلقة بالطرق المنتهية في P يسهم كل واحد منها إسهاماً فعالاً في عملية جمعها بالطريقة المعهودة (ذلك أن هذه الطرق تستغرق أزمنة شبه متساوية) ، في حين أن الأسهم المتعلقة بالطرق المنتهية في Q يلغي بعضها بعضا في عملية الجمع (لأن أزمنة الطرق المتعلقة بها متفاوتة كثيرا) . والنتيجة : إن المضاعف الفوتوني Q لا يصدر «تكات» .

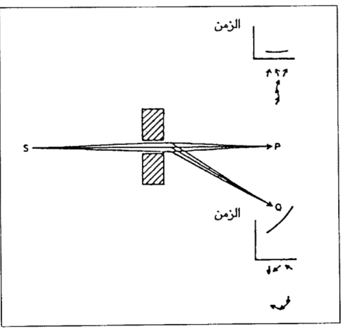


(شكل ٣٣)

إن الضوء لا يسير في خط مستقيم فحسب ، بل يمكنه أن يسلك الطرق المجاورة . وإذا كانت الفرجة بين الحاجزين (المخططين) واسعة بما يكفي لاحتواء هذه المسارات المتجاورة فان الفوتونات تذهب إلى P «عادة» ولا يذهب عملياً أي منها إلى Q.

لكن إذا قرّبنا اللبنتين ، إحداهما من الأخرى ، سيأتي وقت يأخذ فيه الكاشف Q بإصدار «تكات» ، لماذا؟ لأن ضيق الفتحة لم يعد يتسع إلا لعدد قليل من الطرق الذاهبة إلى Q ، وتكون متجاورة جداً لدرجة أن تستغرق أزمنة شبه متساوية ، فتصبح الأسهم المتعلقة بها فعالة في عملية الجمع المعهود (شكل ٣٤) . وواضح ، في

هذه الحالة ، أن قلة عدد الطرق النافذة من الفتحة ، سواءً إلى P أو إلى Q ، تجعل عدد الأسهم لكل من الكاشفين قليلاً فنحصل على سهمين حاصلين صغيرين كليهما (احتمالين صغيرين) ، أي على ضوئين ضعيفين في الكاشفين ؛ لكن هذا لا يمنع أن عدد التكات الصادر عن Q شبه مساو لما يصدر عن P . وخلاصة القول : إننا ، عندما نحاول الحصول على حزمة ضوء ضيقة ، يرفض الضوء أن يتعاون معنا فيتشتت في كل اتجاه(*).



(شكل ٣٤)

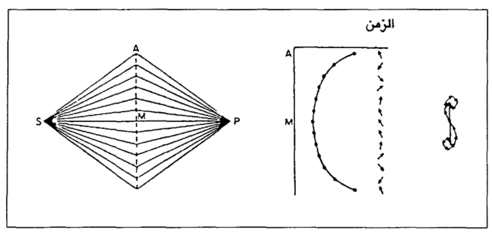
عندما تكون الفرجة بين الحاجزين ضيقة لدرجة أن لا تسمح إلا بمرور مسارات قليلة جداً ، فإن الضوء الذي يمر منها قادر على الذهاب الى Q كما يقدر على الذهاب إلى P ، لأن عدد الأسهم الناجمة عن المسارات الذاهبة إلى Q لا يكفي لانعدام السهم الحصيلة .

وهكذا ترون أن فكرة انتشار الضوء في خط مستقيم ليست سوى تقريب سهل يتيح شرح ما حدث في عالمنا هذا ؛ إنه من قبيل التقريب الذي يدعو إلى القول ، في حال الانعكاس عن مرآة ، بأن زاوية ورود الضوء تساوي زاوية انعكاسه .

(*) لدينا هنا صورة لما يسمى «مبدأ الارتياب uncertainty Principle» . هناك ، بمعنى ما «تتامّية complementarity» بين معرفة طريق الضوء في الفتحة بين اللبنتين وبين معرفة طريقه بعدهما ؛ ومن المستحيل بلوغ هاتين المعرفتين معاً في وقت واحد وبدقة تامة . يجب أن نضع نص هذا المبدأ في سياقه التاريخي : عندما انبعثت ، شيئاً فشيئاً ، الأفكار الثورية للفيزياء الكمومية ، اجتهد الفيزيائيون في تأويلها بوساطة الأفكار القديمة (لاسيما بفكرة أن الضوء يذهب في خط مستقيم) . لكن بما أن الفشل كان دوماً نصيب هذه المحاولات ، أصبح رجال العلم أكثر حذراً : «انتبهوا! إن الافكار القديمة تصبح باطلة بمجرد أن . .» لكن إذا تخلينا عن الأفكار القديمة لصالح الأفكار التي اشرحها لكم (جمع الأسهم المتعلقة بكل الأساليب المتاحة) ، تنتفي الحاجة الى الاستعانة بأي مبدأ ارتياب! .

لكن الطريقة التي أتاحت لنا، بفضل حيلة ما، أن نبيح للضوء الانعكاس بعدة زوايا، هي التي تتيح إيجاد الحيلة التي نبيح بها للضوء أن يذهب من نقطة لأخرى على عدة طرق.

في البدء، وللتبسيط، أرسم خطا شاقولياً متقطعاً (شكل ٣٥) بين المنبع والكاشف (ليس لهذا الخط أي معنى، إنه تخيلي فقط)، ولن أهتم إلا بالطرق المؤلفة من قطعتين مستقيمتين. إن المنحني الذي يحوي الأزمنة اللازمة لقطع تلك الطرق يشبه بشكله المنحني الذي وجدناه في حال المرآة؛ كل ما هنالك أنني رسمته هنا بشكل شاقولي. يبدأ هذا المنحني من A فينعطف تدريجيا (لأن الطرق المارة في وسط الخط المتقطع أقصر) ثم يعود إلى شاقول نقطة البدء.



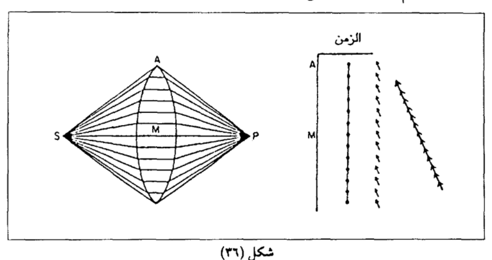
(شكل ٣٥)

إن تحليل الطرق المتاحة للذهاب من S إلى P يصبح بسيطاً جداً إذا لم ندرس سوى المسارات المؤلفة من قطعتين مستقيمتين متصلتين عند المستقيم المتقطع. وعلى شاكلة ما يحدث في الواقع، وهو أشد تعقيداً، نرى ظهور نهاية صغرى في منحني تغير زمن المسير بتغير الطريق. وهنا نرى أيضا أن الأسهم المجاورة لهذه النهاية الصغرى هي التي تسهم بأكبر الأقساط في السهم الحصيلة.

أقترح عليكم الآن اللعبة البسيطة التالية. سوف «نخادع» الضوء فنتدبر أمرنا بحيث تصبح كل الطرق، بين A و B، ذات زمن واحد. فكيف نفعل ذلك كي نجعل زمن المسار على الطريق الأقصر، المار بـM، مساوياً زمن المسار على الطريق الأطول، المار بـA؟.

لقد ذكرنا أن الضوء أبطأ في الماء منه في الهواء، وهو أيضاً أبطأ في الزجاج منه في الهواء. فإذا وضعنا إذن على الطريق الأقصر (المار بـ M) ثخناً مناسباً من الزجاج (شكل ٣٦)، نستطيع أن نجعل زمن السير على هذا الطريق مساوياً زمن

السير على الطريق المار بـ A . ومن أجل الطرق الأبعد أكثر فأكثر عن M نضع ثخانات من الزجاج أصغر فأصغر . وهكذا نستطيع إذن ، إذا أجرينا بعناية حساب كل ثخن من الزجاج بما يناسب المسار المستهدف ، أن نعدم الفروق الزمنية بين كل الطرق ، فتصبح كل أزمنتها متساوية . فإذا رسمنا الآن الأسهم الصغيرة المتعلقة بكل الطرق نجد أن لها كلها اتجاهاً واحداً صاعداً ، ولما كان عددها يساوي الملايين نجد ، بعد جمعها ، أن السهم الحصيلة طويل جداً.



شكل (٣٦)

نستطيع أن «نخادع» الطبيعة بتبطئة الضوء على المسارات الأقصر طولا . ولأجل ذلك ندسُّ على طريق الضوء زجاجا يتزايد ثخنه كلما قصر المسار وبحيث يصبح للطرق الضوئية كلها زمن واحد . عندئذ تتجه الأسهم كلها باتجاه واحد ، فيصبح السهم الحاصل أكبر ما يكون ، أي أن النقطة تستقبل كمية كبيرة من الضوء . وقطعة الزجاج هذه المصنوعة بشكل يزيد في احتمال ذهاب الضوء من نقطة المنبع إلى نقطة أخرى تسمى عدسة مقربة .

لا شك أنكم حزرتم ماذا تشكل تلك القطع الزجاجية الصغيرة : عدسة مقربة ، نعم! هكذا ، بتدبير أمر تلك الأزمنة كي تصبح متساوية كلها ، نحصل على احتمال كبير جدا كي يصل الضوء إلى نقطة معينة ـ ينعدم عملياً احتمال أن يصل إلى نقطة أخرى .

لقد هدفتُ ،من الأمثلة التي تناولتها ، إلى أن أُريكم كيف تتيح نظرية الإلكتروديناميك الكمومي ، اللامعقولة في ظاهرها ، والمناقضة لفكرة السببية causality ، والتخيلية تماما والمستغنية عن كل آلية أساسية ، أن نفسر كل الظواهر المألوفة ، كانعكاس الضوء عن المرآة وانكساره عند السطح الفاصل بين الهواء والماء وتجمعه بعد اختراق العدسة الزجاجية . لكن هذا ليس كل شيء ؛ فهذه النظرية تفسر أيضاً ظواهر ربما لم تروها قط ، كالانعراج بالشبكات ، وسواها كثير . والواقع أن هذه النظرية تتسع لكل الظواهر الضوئية .

لقد بيَّنت لكم، من خلال الأمثلة، كيف يُحسب احتمال حادث يمكن أن يقع بعدة أساليب: الواجب عندئذ أن نرسم سهماً لكل أسلوب وأن نجمع كل الأسهم التي نحصل عليها. وأقصد «بجمع الأسهم» العملية التي تقضي بربطها واحداً بالآخر، بحيث ينطبق رأس كل سهم على ذيل السهم الذي يليه، وبرسم السهم «الحصيلة» النهائي. ومربع طول هذا السهم النهائي يساوي احتمال وقوع الحادث المقصود.

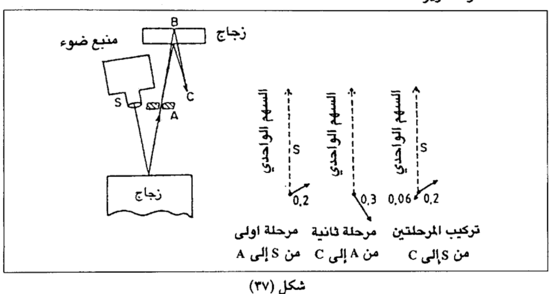
ولكي تأخذوا فكرة أكمل عن هذه النظرية الكمومية، سأريكم الآن كيف يحسب الفيزيائيون احتمال حادث مُركَّب؛ ونقصد بذلك حادثاً يمكن تقسيمه إلى مراحل، أو يحوي عدة «حوادث فرعية» مستقلة.

لنا بهذا الصدد مثال جيد في حادث مركَّب هو تعديل التجارب التي عالجناها، تلك التي كنا أرسلنا فيها فوتونات حمراء على سطح وحيد زجاجي، كي نبرز ظاهرة الانعكاس الجزئي. وبدلاً من أن نضع في A مضاعفاً فوتونياً، نضع حاجزاً (شكل ٣٧) فيه ثقب لا يسمح بالمرور إلا للفوتونات التي تصل إلى A لتمر بعدئذ إلى صفيحة زجاجية موضوعة في B، ونضع كاشفاً في C. فكيف نحلل احتمال ذهاب الفوتون من المنبع إلى C؟.

نستطيع أن نتمثل هذا الحادث على أساس تتابع مرحلتين: أولاهما ذهاب الفوتون من المنبع إلى A بعد أن ينعكس على سطح الزجاج، والثانية ذهاب الفوتون من A إلى C، حيث يوجد الكاشف، بعد ارتداده عن الصفيحة الزجاجية الموجودة في B. فبكل واحدة من هاتين المرحلتين يتعلق سهم حصيلة ـ «سعة» (سأستخدم بعد الآن هاتين الكلمتين، سهم وسعة، بمعنى واحد) ـ ويمكن حساب كل من السعتين بتطبيق القواعد المعهودة. ونحن نعلم أن طول السعة المتعلقة بالمرحلة الأولى يساوي 0.2 (مربعها، 0.04، هو احتمال الانعكاس عن سطح زجاجي وحيد) ويتجه باتجاه معين، لنقل اتجاه العقرب الصغير لميقاتية تشير إلى رقم الساعة الثانية (شكل ٣٧).

ولحساب السعة المتعلقة بالمرحلة الثانية نضع المنبع في A مؤقتا؛ فيرسل فوتونات إلى صفيحة الزجاج الموضوعة فوق A. لنرسم السهمين المتعلقين بالانعكاس عن وجهي الصفيحة، ولنجمعهما معا. لنفترض أننا نحصل على سهم حصيلة طوله 0.3 ويتجه باتجاه العقرب الصغير لميقاتية تشير إلى رقم الساعة

الخامسة . والآن تنطرح مسألة تركيب هذين السهمين الحاصلين (الحصيلتين) تركيباً يعطي سعة الحادث المقصود بتمامه (ذهاب الفوتون من المنبع إلى الكاشف C). وهذا ما سيقودنا إلى تناول هذين السهمين تناولاً جديداً بطريقة التصغير reduction والتدوير .



شكل (٣٧)

يمكن تحليل الحادث المركب إلى مراحل متوالية . وفي هذا المثال يمكن تقسيم مسار الفوتون ، الذاهب من S إلى C ، إلى مرحلتين :
١) الفوتون يذهب من S إلى A ؛ ٢) الفوتون يذهب من A إلى C . يمكن تحليل كل مرحلة على حدة . والسهم المتعلق بها يمكن أيضا أن يعتبر (وهذه طريقة أخرى في تناول الموضوع) ناجماً عن السهم الواحدي (طوله يساوي 1 ويتجه باتجاه الشاقول الصاعد ،نقول باتجاه الساعة ١٢) بعد إجراء عملية تصغير لطوله وعملية تدوير لاتجاهه . وفي هذا المثال هنا يتعلق بالمرحلة الأولى تصغير نسبته 0,2 وتدوير ينقل الاتجاه من الساعة ١٢ إلى الساعة ٢ . أما المرحلة الثانية فتقتضي بتصغير إضافي نسبته 0,3 وتدوير إضافي يغير الاتجاه السابق بمقدار ٥ ساعات . نحصل على السعة الإجمالية للمرحلتين بإجراء العمليات المذكورة واحدة بعد أخرى : نصغر السهم الواحدي من 1 إلى 0,2 وندوره من الساعة ١٢ إلى الساعة ٢ . عندئذ نحصل على سهم نصغره بضرب طوله بـ 0,3 (كأنه كان سهماً واحدياً) وندوره بزاوية تعادل ٥ ساعات . وبذلك نجد سهماً نهائيا (يمثل سعة الحادث بتمامه) طوله 0,06 ويتجه نحو الساعة ٧ . إن مجمل هذه العمليات يسمى «ضرب» السهمين .

طول السعة الأولى هنا 0.2 وتشير إلى «الساعة الثانية» . تصوروا أننا انطلقنا من «سهم واحدي» أي سهم طوله يساوي 1 ومتجه باتجاه الشاقول الصاعد (يشير إلى الساعة ١٢) . فإذا أجرينا على هذا السهم تصغيراً ينزل بطوله من 1 إلى 0.2 ثم تدويراً يحرفه من الساعة ١٢ إلى الساعة ٢ ، نحصل على سعة المرحلة الأولى (من S إلى A) . كما أن بالإمكان اعتبار السهم المتعلق بالمرحلة الثانية (من A إلى C) على أنه ناجم عن تصغير (من 1 إلى 0.3) وتدوير (من الساعة ١٢ إلى الساعة ٥) .

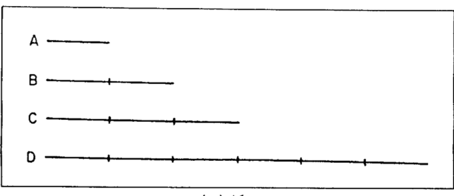
إن تركيب السهمين المتعلقين بالمرحلتين يُحصل عليه بإجراء عمليتي التصغير والتدوير واحدة بعد أخرى . نبدأ إذن بتصغير السهم الواحدي من 1 إلى 0.2 ونقوم بتدويره من الساعة ١٢ إلى الساعة ٢ ؛ ثم نجري على السهم المحصول عليه عندئذ تصغيراً ثانياً من 0.2 إلى ثلاثة أعشار 0.2 ، وتدويراً ثانياً بمقدار ٥ ساعات . نجد في نهاية هذه العمليات سهماً طوله 0.06 ومتجهاً نحو رقم الساعة السابعة. والاحتمال الناجم عن هذا السهم الأخير يساوي مربع 0.06 ، أي 0.0036.

إذا تفكرنا جيداً بما فعلناه نرى أننا كان بإمكاننا الوصول إلى هذه النتيجة نفسها إذا أجرينا ، دفعة واحدة على السهم الواحدي ، تدويراً يساوي مجموع التدويرين (الساعة ٢ + الساعة ٥= الساعة ٧) وتصغيراً يساوي جداء التصغيرين (0.2 x 0.3 =0.06) أي جداء طولي السهمين . إن وجوب أن نجمع الزاويتين، للحصول على اتجاه السهم النهائي الأخير ، أمر واضح جداً : ذلك أن اتجاه السهم ، أي سهم ، يتعين بزاوية دوران عقرب المزمان التخيلي : ومن الطبيعي أن يكون السهم الممثل لحادث ذي مرحلتين متواليتين ذا اتجاه ناجم عن جمع زاوية دوران المرحلة الأولى مع زاوية دوران المرحلة الثانية .

إن العملية التي أتيت على وصفها تسمى «ضرب» سهم بسهم . وهي تحتاج إلى بعض الشروح .

لنعتمد ، للحظة ، وجهة نظر الإغريقيين في عملية الضرب (ليس لهذا الأمر شأن في موضوع محاضرتي) . فللحصول على أعداد ليست بالضرورة أعداداً صحيحة ، كان الإغريق يمثلون الأعداد بقطع مستقيمة . وكل عدد قابلٌ لأن يُفهم على أساس أنه ناجم عن تحويل يتناول القطعة الواحدية ، وهو إما تصغير أو تكبير. افترضوا ، مثلاً ، أن A (شكل ٣٨) هي القطعة الواحدية ؛ عندئذ تمثل B العدد 2 ، و C العدد 3.

وبعد هذا كيف نعمل لضرب 3 بـ 2؟ يكفي أن نطبق التحويلات واحدا بعد الآخر . أنطلق من A ، القطعة الواحدية ، فأكبِّرها 2 مرة ، ثم بعد ذلك 3 مرات (أو ، وهذا كذاك ، 3 مرات ثم 2 مرة ـ لا أهمية للترتيب) . أحصل عندئذ على القطعة D، التي يمثل طولها العدد 6 . وما العمل الآن لو أردت ضرب 1/3 بـ 1/2؟ أتخذ القطعة D كقطعة واحدية ، أُصغِّرها إلى نصفها (فأحصل على C) ، ثم أُصغِّرها إلى ثلثها فأحصل على القطعة A التي تمثل 1/6 من C.



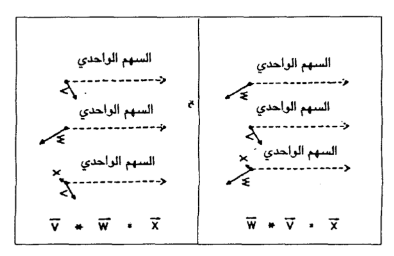
شكل (٣٨)

إن العدد ، أي عدد ، يمكن أن يُعتبر عملية تحويل نجريها على القطعة الواحدية . إذا كانت A تمثل الواحد ، فإن B تمثل العدد 2 (تكبير بنسبة 2) وتمثل C العدد 3 (تكبير بنسبة 3) . وتتم عملية الضرب بإجراء التحويلين ، المتعلقين بحدي الضرب ، على القطعة الواحدية بالتوالي . فلضرب 3 بـ 2 مثلا نبدأ بتكبير القطعة الواحدية بنسبة 3 ثم نكبر النتيجة تكبيراً آخر بنسبة 2 . نحصل عندئذ على قطعة D ، أكبر من الواحدية بنسبة 6 . وإذا اتخذنا الآن القطعة D كقطعة واحدية ، فان القطعة C تمثل العدد 1/2 (تصغير إلى النصف) والقطعة B العدد 1/3 (تصغير إلى الثلث) . أما جداء 1/2 بـ 1/3 فيعود إلى تصغير D إلى نصفها ثم تصغير النتيجة إلى ثلثها . نحصل عندئذ على تصغير القطعة الواحدة بنسبة 1/6 : نجد A.

إن الضرب السهمي يعمل بهذه الطريقة نفسها (شكل ٣٩) . نطبق على السهم الواحدي التحويلات التي تمثل شتى «الضروب» الواجب إجراؤها ، واحداً بعد آخر ، علماً أن الفرق الوحيد هنا هو أن ضرب الأسهم معاً ينطوي على عمليتين اثنتين بدلاً من واحدة : تصغير وتدوير . فلضرب السهم V بالسهم W نبدأ بتصغير وتدوير السهم الواحدي بما يتيح الحصول على V ، ثم نصغِّر وندوِّر V بالمقادير التي يدلُّ عليها W ؛ وهنا أيضاً ليس لترتيب العمليات أهمية . فالضرب السهمي يخضع إذن لقواعد التحويل المعروفة في مجموعة الأعداد العادية(*).

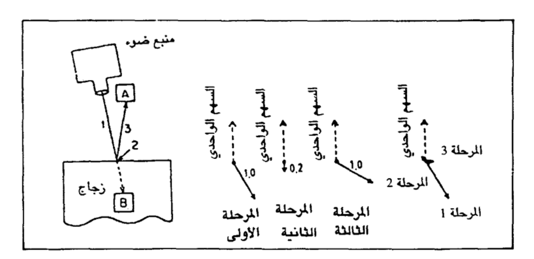
(*) لقد اجتهد الرياضيون في تحديد. كل الأشياء التي تذعن لقواعد الجبر (A+B=B+A، A×B=B×Aالخ) . كانت هذه القواعد في البدء تخص الأعداد الصحيحة (غير الكسرية) الموجبة ، تلك التي تُستخدم في عد التفاح والأشخاص . ثم أضيف لهذه الأعداد الصفر والأعداد الكسرية والأعداد الصماء irrationels (تلك التي لا يمكن تمثيلها بنسبة عددين صحيحين) وأخيراً الأعداد السالبة ، دون أن يطرأ على قواعد الجبر أي فساد . لكن إدخال بعض الأعداد التي خرجت من خيال الرياضيين لم يكن ليحدث دون مشاكل : إذ كيف نتصور أن نتكلم عن نصف الشخص؟ لكن هذه الصعوبات اختفت اليوم كلها : القول بوجود ٣,٢ اشخاص في الكيلومتر المربع لا يطرح أية مشكلة إنسانية ولا يثير نوازع عدوانية دموية . فلا حاجة للجهد في تصور ما يعنيه ٠,٢ من الشخص؟ ونحن نعلم أن العدد ٣,٢ المذكور يجب أن يفهم بأنه يمثل ٣٢ شخصا في كل ١٠ كيلومترات مربعة . وعلى هذا فالأشياء التي تطيع قواعد الجبر يمكن أن تنطوي على فائدة للرياضيين ، حتى ولو لم تتعلق بأي ظرف واقعي . ومنها الأسهم المرسومة في مستوى الورقة ، فهي يمكن أن «تُجمع» بتعليق رأس كل سهم بذيل السهم الذي يليه ، وأن «تُضرب» بعمليتي تصغير وتدوير ، مذعنه في الحالين إلى قواعد الجبر في الأعداد العادية ؛ ذلك هو السبب في اطلاق الرياضيين عليها اسم الاعداد . لكنهم ، لتمييزها عن الأعداد العادية ، يصفونها بـ «العقدية complex» . ولمن مارس منكم الرياضيات حتى وصل إلى الأعداد العقدية كنت سأقول : «ان احتمال حادث معين هو «طويلة module» عدد عقدي ، وعندما يتاح للحادث أن يقع بعدة اساليب ، نجمع الأعداد العقدية المتعلقة بها ؛ وعندما يمكن للحادث أن يُقسم إلى مراحل متوالية ، نضرب معا الأعداد العقدية المتعلقة بكل هذه المراحل» . إن هذه الطريقة في الكلام ذات سمات جدية وعلمية واضحة ، لكن ما تعبر عنه لا يزيد شيئا عما قلته حتى الآن ، غير أنني اخترت في هذا الحديث لغة اخرى .

لنعد، بعد هذا، إلى التجربة الأولى في محاضرتي السابقة (الانعكاس الجزئي عن سطح وحيد) ولنفحصها كمراحل متوالية (شكل ٤٠). إن الطريق الذي يسلكه الضوء في الانعكاس ينقسم إلى ثلاثة مراحل (1) الضوء يذهب من المنبع إلى سطح الزجاج؛ (2) ينعكس عن الزجاج؛ (3) يذهب من الزجاج إلى الكاشف A. يمكن أن نعتبر كل مرحلة تحويلاً (تصغيراً وتدويراً) يتناول السهم الواحدي.



شكل (٣٩)

إن ضرب الأسهم، على الصعيد الرياضي، يمكن أن يُعتبر أيضاً سلسلة تحويلات (في هذه الحالة تصغيرات وتدويرات) تتناول السهم الواحدي. وكما في الضرب العادي، لا يهم ترتيب هذه التحويلات: فالسهم X نحصل عليه إما بضرب V بـ W أو بضرب W بـ V.



الشكل (٤٠)

الإنعكاس بسطح واحد يمكن تقسيمه إلى ثلاث مراحل متوالية، تُسلط كل منها على السهم الواحدي تصغيراً أو / وتدويراً. فنحصل على سهم طوله 0,2، كذلك الذي حصلنا عليه في المحاضرة الأولى، لكن التحليل الوارد هنا أكثر عمقاً.

ربما تتذكرون أنني ، في المحاضرة الأولى ، لم آخذ في الحسبان كل الطرق التي يمكن أن يسلكها الضوء المنعكس ؛ كان هذا سيجبرني على رسم حشد من الأسهم الصغيرة . فلتحاشي الدخول في التفاصيل تصرفتُ وكأن الضوء يتجه نحو نقطة خاصة من سطح الزجاج ، دون أن يتشتت . لكننا نعلم الآن أن الضوء ، في ذهابه من نقطة لأخرى ، يتناثر بكل معنى الكلمة (ما لم نمنعه من ذلك بوساطة عدسة) . ورغم أن هذا التناثر يتسبب في تصغير السهم الواحدي ، أكتفي ، في الوقت الحاضر ، بالفرضية الأبسط وأعتبر أن الضوء لا يتناثر ؛ وعلى هذا لن أهتم بتصغير السهم الواحدي الذي ذكرته . وأخيراً ، وضمن هذه الفرضية أيضاً ، يصبح من المعقول افتراض أن كل فوتون مغادرٍ للمنبع سيذهب إلى A أو إلى B.

في هذه الشروط لا نُجري على السهم الواحدي أي تصغير ، لكن لا بد من إجراء تدوير له يتعلق بدوران عقرب المزمان التخيلي الذي يقيس زمن ذهاب الفوتون من المنبع إلى سطح الزجاج الأمامي . لنقل ، لمتابعة الحساب ، إن السهم المتعلق بالمرحلة الأولى له طول يساوي 1 ويتجه نحو رقم الساعة الخامسة .

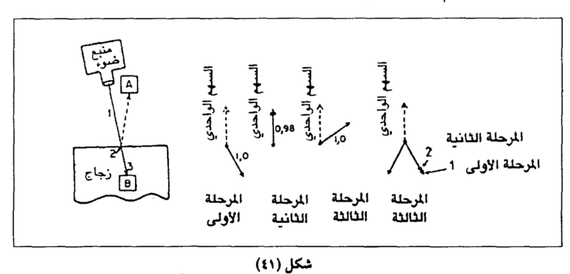
المرحلة الثانية هي انعكاس الفوتون عن الزجاج . لا بد هنا من إجراء تصغير (من 1 إلى 0.2) وتدوير قيمته نصف دورة . (إن هذه الأرقام تبدو لكم اليوم اعتباطية ؛ والواقع أنها تتعلق بنوع المادة التي تعكس الضوء ، وسأشرح لكم في المحاضرة التالية من أين تأتي هذه الأرقام) . فالسعة التي تمثل المرحلة الثانية لها إذن طول يساوي 0.2 واتجاه دار نصف دورة (يذهب نحو الساعة السادسة) .

والمرحلة الأخيرة هي ذهاب الفوتون من سطح الزجاج إلى الكاشف A (شكل ٤٠) . هنا ، كما في المرحلة الأولى ، لا داعي لتصغير السهم ، بل لا بد من تدويره ؛ وبما أن المسافة التي على الفوتون أن يقطعها في هذه المرحلة أقصر قليلا من مسافة المرحلة الأولى ، لنقل إن السهم هنا يتجه نحو رقم الساعة الرابعة .

بقي علينا الآن أن نضرب معاً أسهم المراحل الثلاث ، 1و 2و 3 ، أي أن نجمع الزوايا ونضرب الأطوال . نتأكد عندئذ أن المفعول الإجمالي للمراحل الثلاث ـ (1) تدوير ، (2) تصغير وتدوير نصف دورة ، (3) تدوير ـ لا يختلف بتاتاً عما وجدناه في المحاضرة الأولى . أي أن التدوير المتعلق بالمرحلتين 1 و 3 معاً (الساعة ٥ + الساعة ٤) يساوي فعلاً ما داره عقرب المزمان التخيلي عندما كان يقيس زمن الفوتون لقطع الطريق كله («الساعة ٩») . أما بخصوص نصف الدورة المضاف في المرحلة (2)

فيقابل الطريق كله («الساعة ٩») . أما بخصوص نصف الدورة المضاف في المرحلة (2) فيقابل في الواقع ، الذي ذكرناه في المحاضرة الأولى ، وجوب أن نعتمد لاتجاه السهم ، المتعلق بالانعكاس عن الزجاج ، عكس الاتجاه الذي يتخذه عقرب المزمان التخيلي . وفي الوقت ذاته نرى أن التصغير ، من 1 إلى 0.2 ، الذي أُجري على سهم المرحلة 2 ، يقود فعلاً إلى نسبة الانعكاس الجزئي ، 0.04 ، الذي لحظناه من أجل انعكاس عن سطح زجاجي وحيد .

إن هذه التجربة تطرح مسألة لم أذكرها في محاضرتي الأولى : ماذا يحدث للفوتونات الذاهبة نحو B ، تلك التي تخترق سطح الزجاج؟ لأول وهلة نظن أن السعة للفوتون الواصل إلى B يجب أن تكون ذات طول مساو تقريبا 0.98 ، لأن 0.98 X 0.98 =0.9604 ، وهي نتيجة قريبة من 0.96 . لكن هذه السعة يمكن تحليلها تحليلاً أدق بتقسيم الحادث إلى عدة مراحل (شكل ٤١) .



شكل (٤١)

إن اختراق سطح واحد يمكن أيضا تقسيمه إلى ثلاث مراحل متوالية ، تسلِّط كل منها على السهم الواحدي تصغيراً أو / وتدويراً . نحصل على سهم نهائي طوله 0.98 يعطي ، بتربيعه ، احتمال اختراق مساوياً 0.96. وبجمع هذا الاحتمال مع احتمال الانعكاس (4%) نجد الاحتمال الكلي 100%.

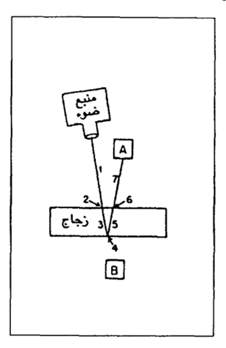
المرحلة الأولى لا تختلف عن أولى المراحل في الذهاب إلى A : الفوتون يذهب من المنبع إلى سطح الزجاج ؛ السهم الواحدي لا يعاني سوى تدوير ينقله من الظُّهر (الساعة ١٢) إلى الساعة ٥ .

المرحلة الثانية هي اختراق السطح الزجاجي ؛ ولا يتعلق بهذا الاختراق أي تدوير ، بل يستدعي تصغيرا طفيفاً ، من 1 إلى 0.98.

المرحلة الثالثة، سير الفوتون في الزجاج، تستدعي تدويراً إضافياً وتستغني عن التصغير. وهكذا نحصل أخيراً على سهم، للطريق كله، طوله 0.98 ويتخذ اتجاهاً معيناً، ومربع طوله يعطي فعلاً القيمة 0.96 كاحتمال لذهاب الفوتون من المنبع إلى B.

لندرس الآن من جديد ظاهرة الانعكاس الجزئي عن وجهي صفيحة زجاجية. فالانعكاس عن الوجه الأمامي يطابق الانعكاس عن سطح وحيد، ويمكن إذن تقسيمه إلى ثلاث مراحل، كما فعلنا في الشكل (٤٠).

أما الانعكاس عن الوجه الخلفي فيمكن تقسيم طريقه إلى سبع مراحل واضحة على الشكل (٤٢). ونرى بسهولة ما يلي: إن التدوير الإجمالي يساوي دوران عقرب المزمان في أثناء قطع الفوتون للمسافة من المنبع إلى A (المراحل: 1و 3و 5و 7). أما التصغير فهو حاصل ضرب التصغيرات المعترضة في المرحلة 4 (من 1 إلى 0.2) والمرحلتين 2 و 6 فنحصل أخيراً على سهم يتجه في نفس الإتجاه الذي رأيناه فعلاً في المحاضرة الأولى، لكن طوله يساوي تقريبا 0.192 أي (0.98 x 0.2 x 0.98) الذي كنت قرّبته إلى 0.2.



شكل (٤٢)

إن حادث الانعكاس بسطح خلفي لصفيحة زجاجية يمكن أن ينقسم إلى سبع مراحل متوالية. المراحل 1و 3و 5 و 7 لا تعطي السهم الواحدي سوى تدويرات، أما المرحلتان 2 و 6 فتعطي كل منهما تصغيرا نسبته 0.98، وتعطي المرحلة 4 تصغيراً نسبته 0.2. نحصل في النهاية على سهم طوله 0.192 (وهو عدد كتبناه 0.2 في المحاضرة الأولى) ودار اتجاهه من الساعة ١٢ بزاوية يعينها عقرب المزمان الذي يقيس الزمن الذي يستغرقه الضوء لقطع الطريق كله من المنبع إلى A.

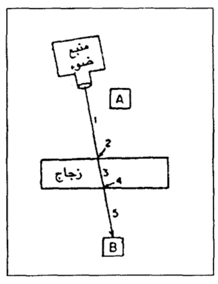
إليكم إذن باختصار القواعد التي تحكم ظواهر انعكاس الضوء ومروره إلى الوسط الآخر :

١) الانعكاس من الهواء في الهواء (على سطح فاصل لوسط آخر) : تصغير السهم الواحدي بنسبة 0.2 وتدويره نصف دورة ؛

٢) الانعكاس من الزجاج في الزجاج (على الوجه الخلفي لصفيحة) : تصغير بنسبة 0.2 أيضاً ولكن دون تدوير ؛

٣) المرور من الزجاج إلى الهواء أو من الهواء إلى الزجاج : تصغير بنسبة 0.98 دون تدوير .

هذا ، ورغم علمي بأن الإنسان يملُّ من كل شيء ، إلا أنني لا أستطيع مقاومة المتعة في أن أُبيّن لكم ، بمثال آخر ، كيف يتم ذلك كله وما تتيحه قواعد التحليل المرحلي هذه . سأنقل الكاشف وأضعه تحت صفيحة الزجاج ؛ وأطرح الآن السؤال التالي (الذي أهملناه في المحاضرة الأولى) : ما هو احتمال أن يخترق الفوتون وجهي الزجاج كليهما واحداً بعد الآخر (شكل ٤٣)؟



شكل (٤٣)

إن اختراق السطحين يمكن تقسيمه إلى خمس مراحل متوالية . في المرحلة 2 يُصغَّر السهم الواحدي إلى قرابة 0.98 من طوله . وفي المرحلة 4 يُصغر السهم الجديد إلى 0.98 من طوله ، فتكون النتيجة تصغيراً للسهم الواحدي إلى قرابة 0.96 من طوله . لكن المراحل 1و 3 و5 لا تقتضي سوى تدويرات . والسهم النهائي ، الذي طوله 0.96 ، يعطي بتربيعه احتمال أن يخترق الفوتون الصفيحة كلها ، أي 92% . ونسبة الاختراق هذه تبقي للانعكاس نسبة (احتمالا) قيمته 8% . لكننا نعلم أن هذا لا يحدث إلا مرتين في الدور الواحد (من الشكل ١٨) . وعندما يكون ثخن الصفيحة يؤدي إلى نسبة انعكاس تساوي 16% تصبح هذه المحاكمة هنا مغلوطة ، لأن حاصل جمع الاحتمالين (92% + 16%) يعطي احتمالا كلياً أكبر من 100%! وهذا غير معقول ، فما السبب؟ السبب واضح في الشكل (٤٤) .

الجواب واضح : إن احتمال أن يصل الفوتون إلى B نحصل عليه ، ببساطة ، من طرح احتمال أن يصل إلى A من 100% ؛ وقد حسبنا في المثال السابق احتمال وصوله إلى A . فإذا كان احتمال الوصول إلى A مساوياً 7% ، يكون احتمال الوصول إلى B مساويا 93% . ولما كنا نعلم أن احتمال الوصول إلى A يتراوح بين 0% و 16% (بحسب ثخن الصفيحة) نستنتج أن احتمال الوصول إلى B يتراوح بين 100% و 84%.

صحيح أن الجواب بهذه المحاكمة واضح . لكن يجب أن يكون بالإمكان أيضاً الوصول إلى النتيجة نفسها بتربيع طول سهم ، كما يحدث لكل احتمال يحترم نفسه . فكيف نعمل لحساب سعة اختراق الصفيحة الزجاجية كلها؟

كيف يمكن للسهم المتعلق بالاختراق أن يتغير طوله بما يضمن أن يظل مجموع احتمالي الوصول إلى A وإلى B مساوياً دوماً 100% . سنقطع تلك المراحل ، واحدة تلو أخرى ، لنجري على كل مرحلة التصغيرَ والتدويرَ اللازمين .

إن المراحل الثلاث الأولى هي نفسها التي ذكرناها في المثال السابق : ذهاب الفوتون أولاً من المنبع إلى سطح الزجاج (تدوير أول دون تصغير) ، مروره من الهواء إلى الزجاج ثانياً (لا يوجد تدوير بل تصغير بنسبة 98%) ،مسيره في الزجاج ثالثاً (تدوير دون تصغير) .

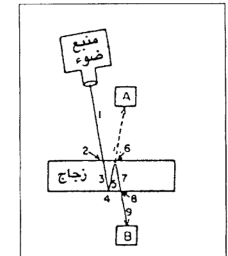
إن المرحلة الرابعة ـ اختراق وجه الصفيحة الخلفي ـ تماثل المرحلة الثانية في كل شيء : لا يوجد تدوير بل تصغير بنسبة 98% على الـ 98% المتبقية بعد المرحلة الثانية ، أي بالإجمال سهم طوله 0.96.

ينفذ الفوتون أخيراً إلى الهواء (المرحلة الخامسة) متجها نحو الكاشف : تدوير جديد دون تصغير . نحصل ، في نهاية المراحل كلها ، على سهم طوله 0.96 ، أما اتجاهه فهو الاتجاه الذي يتخذه عقرب المزمان التخيلي الذي يقيس زمن الذهاب من المنبع إلى الكاشف .

يتعلق بالسهم الذي طوله 0.96 احتمال يساوي قرابة 92% (مربع 0.96) أي أن 92 فوتوناً ، من أصل كل مئة تخرج من المنبع ، تصل إلى B . أو قل إن 8% فقط

تنعكس عن مجمل وجهي الصفيحة وتصل إلى A .لكننا ، في المحاضرة السابقة، وجدنا أن نسبة الإنعكاس الإجمالية لا تساوي 8% إلا أحيانا («مرتين في اليوم» ، أي في الدورة الواحـــدة) ، وأنهـــا تتناوب بين 0% و 16% دورياً لدى ازدياد ثخن الصفيحة . أمر غريب! ما الذي يطرأ عنـــدما يكـــون للصفيحـــة بالضبـط الثخن الذي يجعل نسبة الانعكـــاس مســـاوية 16%؟ هـل يجب أن نرغم أنفسنا على القبول بأن 16 فوتوناً ، من أصل كـــل 100 تغادر المنبع ، تصل إلـــى A وأن 92 فوتوناً تصل دوماً إلى B ، أي ما مجموعة 108%؟ كلا ، إن هذا محال! . لا بد أن هنالك خطأ في استنتـــاجتنا .

الخطأ ، ببسـاطة ، هو أننا لم نأخذ في الحسبـان كل الأسـاليب التي يمكن أن ينتهجها الضوء للذهاب من المنبع إلى B! فالضوء يستطيع ، مثلاً ، أن ينعكس عن الوجه الخلفي ويقطع ثخن الصفيحة مرة ثانية ، وكأنه يتجه نحو A ، ثم ينعكس عن الوجه الأمامي عائداً أدراجه نحو B (شكل ٤٤) . إن هذا الطريق يمكن تقسيمه إلى تسع مراحل . وسندرس الآن ما يحدث للسهم الواحدي في أثناء هذه المراحل التسع (لا تخافوا ، إن السهم الواحدي لا يعاني سوى تصغيرات وتدويرات!) .



شكل (٤٤)

يجب إجراء الحساب بشكل أدق . وهذا يقتضي أن نأخذ في الحسبان أسلوباً أخر متاحاً للفوتون كي يخترق الصفيحة كلها . وهذا الأسلوب ، الموضح هنا ، ينطوي على وجوب إجراء تصغيرين ، كل منهما بنسبة 0.98 (المرحلتين 2 و 8) ثم تصغيرين أخرين ، كل منهما بنسبة 0.2 (المرحلتين 2 و 6)نحصل عنذئذ على سهم نهائي طوله 0,0384 (نعتبره 0.04).

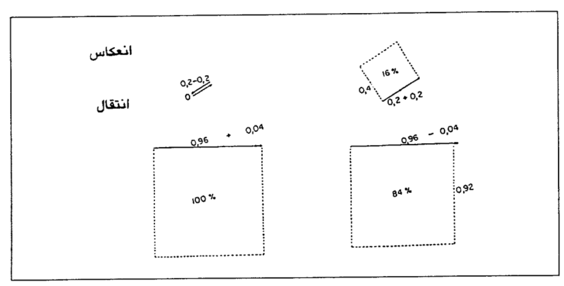
المرحلة الأولى : يسير الفوتون في الهواء : تدوير دون تصغير . المرحلة الثانية: يخترق الفوتون السطح الأمامي (العلوي) : لا تدوير بل تصغير بنسبة 0.98 . المرحلة الثالثة : الفوتون يعبر ثخن الصفيحة كله ، نازلاً ، تدوير دون تصغير . المرحلة الرابعة : الفوتون ينعكس عن السطح الخلفي (السفلي) ؛ لا تدوير بل تصغير بنسبة0.2 يتسلط على الـ 0.98 السابقة ، أي ما مجمله 0.196 . المرحلة الخامسة : الفوتون يعبر ثخن

الصفيحة كله من جديد صاعدًا، تدوير دون تصغير. المرحلة السادسة: الفوتون ينعكس عن السطح العلوي، لا تدوير بل تصغير بنسبة 0.2 يتسلط على الـ 0.196 السابقة، أي ما مجمله 0.0392. المرحلة السابعة: الفوتون يعبر الزجاج نحو الاسفل؛ تدوير دون تصغير. المرحلة الثامنة: الفوتون يخترق السطح السفلي: لا تدوير بل تصغير بنسبة 0,98 يتسلط على الـ 0.0392السابقة، أي ما مجمله 0.0384. المرحلة التاسعة أخيراً: الفوتون يسير في الهواء حتى يبلغ الكاشف: تدوير بلا تصغير.

ففي نهاية هذه العمليات كلها، من تدوير وتصغير، نجد سعة (سهماً) طولها 0.03484 - لنقل 0,04 للتبسيط طالما لا نحتاج إلى دقة أكبر - وقد دارت بزاوية يحددها اتجاه عقرب المزمان التخيلي عندما يقف في نهاية المطاف. وهذه السعة تتعلق بأسلوب ثان متاح للضوء كي يذهب من المنبع إلى الكاشف. فنحن حيال حادث يمكن أن يقع بأسلوبين مختلفين؛ ونعلم أننا يجب علينا، في حال أسلوبين متاحين، أن نجمع السعتين بالطريقة المعهودة. علينا إذن أن «نعلّق» السهم الذي طوله 0.96 (الناجم عن الأسلوب الأول، المباشر، شكل ٤٣) بالسهم الذي طوله 0.04 (الناجم عن الأسلوب الثاني، الطريق الأطول في الشكل ٤٤).

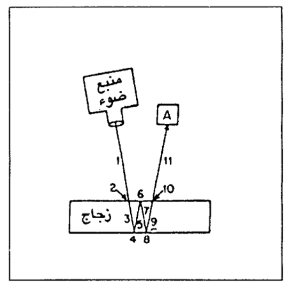
وبتعبير آخر: عندما يكون احتمال الانعكاس معدوماً يكون احتمال الاختراق مساويا 100% (شكل ٤٥). وفي مقابل ذلك، إذا كان مجموع السهمين المتعلقين بالانعكاس مجدياً، أي بحيث يعطي سعة تساوي 0,4، فإن السهمين المتعلقين بالاختراق يُعدِّل أحدهما الآخر معطيين سعة طولها 0.96 −0.04 = 0.92، أي: عندما تكون نسبة الإنعكاس مساوية 16% (مربع 0,4) تكون نسبة الاختراق مساوية 84% (مربع 0.92). لنتوقف لحظة كي نُعجب بمهارة الطبيعة في صنع قوانينها، بحيث تعطي دوماً احتمالاً كلياً يساوي 100%(*).

(*) لابد أنكم لاحظتم، في كل ذلك، أننا استعملنا 0,04 بدلاً من 0384. واعتبرنا أن مربع 0.92 هو 84%، بحيث أصبح مجموع الاحتمالين مساوياً تماما 100%. والواقع أننا لو أخذنا في الحسبان كل الأساليب المتاحة لاستغنينا عن هذه التقريبات: إن الأسهم المتعلقة بكل الأساليب المتاحة تعطي، بجمعها كلها، احتمالاً كلياً يساوي 100%دوماً. ولأولئك الذين يحبون الاستمتاع بهذا النوع من الحسابات أدلُّهم على طريق آخر متاح للضوء كي يذهب من المنبع إلى الكاشف A (شكل ٤٦): ثلاثة انعكاسات وعبوران، تعطي كلها سهماً نهائياً طوله 0,98 × 0.2 × 0.2 × 0.98 = 0.008، أي سهماً صغيراً جداً. فلإجراء الحساب بالكامل للانعكاس الجزئي بالسطحين يجب أن نضيف هذا السهم الثالث إلى الحساب السابق، وكذلك أيضاً سلسلة أسهم أقصر فأقصر تتعلق بخمس انعكاسات، وسبعة، الخ .



شكل (٤٥)

إن الطبيعة تتدبر دوما أمرها كي يكون مجموع احتمالي الاختراق والانعكاس مساوياً 100% .فعندما يكون من شأن ثخن الصفيحة أن يؤدي إلى سعتي اختراق متراكمتين بالجمع ،تصبح سعتا الإنعكاس متفانيتين . والعكس بالعكس ، أي عندما تتراكم سعتا الإنعكاس ، تتفانى سعتا الإختراق .



شكل (٤٦)

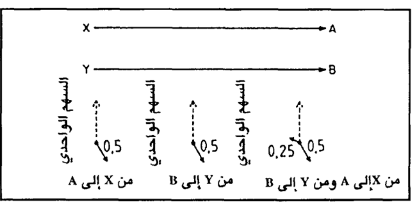
إذا أردنا إجراء الحساب بكل دقة ، يجب علينا أن نأخذ في الحسبان أساليب أخرى متاحة للانعكاس . وقد رسمنا هنا أحد هذه الاساليب ، وهو يؤدي إلى تصغيرين ، كل منهما بنسبة 0.98 (المرحلتين 2 و 10) ،متبوعين بثلاثة تصغيرات ، كل منها بنسبة 0.2 (المراحل 4 و 6 و 8) نحصل بعدئذ على سهم نهائي طوله قرابة 0.008 . ولما كنا هنا حيال أسلوب آخر متاح للانعكاس ، يجب إضافة هذا السهم إلى الأسهم التي أطوالها 0.2 (انعكاسي بالوجه الأمامي) و 0.192 (انعكاس بالوجه الخلفي) .

أخيراً ـ ثم أتوقف ـ أريد أن أقول لكم إن ضرب الأسهم صالح ، ليس فقط في حال حادث يقبل التحليل إلى مراحل متوالية ، بل أيضاً في حال حادث يتطلب تضافر عدة أمور (مستقلة وأحيانا في وقت واحد) . تصوروا ، على سبيل المثال ، أن

لديكم منبعين X و Y وكاشفين A و B (شكل ٤٧) ، وأنكم تريدون أن تحسبوا احتمال أن يستقبل كل من A و B فوتوناً عندما يُصدر كل من X وY فوتوناً.

ترون في هذا المثال أن المسألة ليس فيها انعكاس ولا اختراق ، وأن الفوتونات تذهب مباشرة من المنبع إلى المصب . وسأغتنم هذه الفرصة كي لا أستمر في إهمال ما كنت أهملته حتى الآن ، أي بالتحديد تناثر الضوء في أثناء سيره . سأعرض أمامكم ، بكل بهائها ، القاعدة التي تحكم انتقال الضوء من نقطة من الفضاء إلى أخرى . فليس فيما سأقوله لكم أي نوع من التقريب أو التبسيط . هاكم القاعدة التي تنطوي على كل ما يجب معرفته عن طريق انتشار الضوء وحيد اللون في الفضاء (مع أخذ الاستقطاب بعين الاعتبار) : اتجاه السهم هو اتجاه عقرب المزمان التخيلي الذي يقيس الزمن الذي يستغرقه الضوء لقطع المسافة المقصودة (إن عدد دورات هذا العقرب ، على صفحة المزمان ، من أجل واحدة المسافة يتوقف على لون الضوء) ؛ طول هذا السهم متناسب عكسياً مع طول المسافة المقطوعة (بتعبير آخر ، يعاني السهم تصغيراً تزداد نسبته بازدياد المسافة(*).

لنفترض أن السهم المتعلق بالمسافة من X إلى A ذو طول مساو 0.5 ومتجه نحو الساعة الخامسة ، وأن هذا أيضاً شأن السهم المتعلق بالمسافة من Yإلى B (شكل ٤٧) . فإذا ضربنا هذا السهم بذاك نجد سهماً حاصلا طوله 0.25 ويتجه نحو الساعة العاشرة .

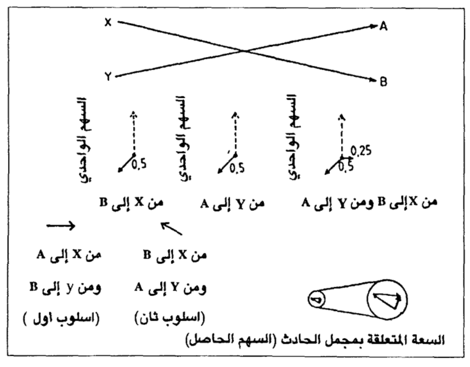


شكل (٤٧)

إذا كان أحد الأساليب المتاحة لوقوع الحادث ينطوي على عدة عمليات تتم بشكل مستقل ، عندئذ تحصل على السعة المتعلقة بهذا الأسلوب من ضرب سعات هذه العمليات المستقلة . الحادث النهائي هنا يمكن أن يوصف كما يلي : في كل مرة يصدر فيها فوتون من X و Y ، «يتك» الكاشفان في Aو B . الأسلوب الأول : فوتون يذهب من X إلى A وفوتون يذهب من Y إلى B («حادثان تحتيان» مستقلان) . نحصل على سعة وقوع هذا الأسلوب الأول من ضرب السهم الناجم عن أحد «الحادثين التحتيين» المستقل (من X إلى A) بالسهم الناجم عن الآخر المستقل (من Y إلى B) . (تتمة هذه المحاكمة في الشكل ٤٨) .

(*) لاحظوا أن هذه القاعدة لا تناقض ما علّموكم إياه في المدرسة ، من أن الطاقة الضوئية المرسلة إلى مسافة ما ، متناسبة عكسياً مع مربع المسافة ، ذلك أن السهم المصغّر إلى نصفه يصبح مربعه أصغر بأربع مرات .

مؤكـد ،لكن هذا ليس كل شيء! إذ يجب أن لا ننسى أن هذا الحـادث يمكن أيضاً أن يقع بالاسلوب التالي : الفوتون الصادر عن X يذهب إلى B ، والفوتون الصادر عن Y يذهب إلى A . وبكل من هذين «الحادثين التحتيين» تتعلق سعـة معينة ، وللحصول على السعة الحصيلة المتعلقة بهذا السلوب الثاني يجب ضرب هاتين «السعتين التحتيتين» إحداهما بالأخرى (شكل ٤٨) . ولئن كان التصغير الذي تفرضه الزيادة الإضافية في الطريق صغيرة جداً ، إلا أن الحال ليست كذلك فيما يخص التدوير ؛ وهذا يعني أن السهمين المتعلقين بالمسارين ، من X إلى B ومن Y إلى A ،لهما عملياً طول (0,5) يساوي طول كل من السهمين الواردين في الأسلوب الأول السابق ، لكن بين الاتجاهين ، هنا وهناك ، فرقاً محسوساً ؛فعقرب المزمان التخيلي المختص باللون الأحمر (مثلاً) يُتم 15000 دورة في كل سنتيمتر واحد من الطريق ؛ فلا عجب إذن ، في هذه الظروف ، إذا كان هذان الطريقان ، رغم تجاورهما الشديد ، يعطيان لعقرب المزمان اتجاهين مختلفين جداً.



شكل (٤٨)

إن الحادث الموصوف في الشكل ٤٧ يمكن أن يقع بالأسلوب الثاني التالي : فوتون يذهب من X إلى B وفوتون يذهب من Y إلى A . هنا أيضا لدينا «حادثان تحتيان» مستقلان . نحصل على سعة وقوع هذا الاسلوب الثاني من ضرب السهمين الناجمين عن «الحادثين التحتيين» . ونحصل على سعة وقوع الحادث ، المتاح له كلا الأسلوبين ، بجمع السعة التي حصلنا عليها هنا (سعة الأسلوب الثاني) مع السعة التي حصلنا عليها هناك (سعة الأسلوب الاول ، شكل ٤٧) . لاحظ أن سعة احتمال وقوع حادث ما ، يتمثل دوماً بسهم نهائي واحد ، مهما كان عدد الأسهم المرسومة ومهما كان عدد عمليات الجمع والضرب الجارية عليها .

نحصل على السعة النهائية بجمع السهمين المتعلقين بالأسلوبين المذكورين . ولما كان لهما عملياً طول واحد فقد يتفق أن يلغي أحدهما الآخر ، ولأجل ذلك يكفي أن يتعاكس اتجاهاهما ، أي أن تزداد الزاوية بينهما ، ولا شيء أسهل من ذلك ، إذ يكفي أن تزداد المسافة بين المنبعين (أو بين الكاشفين) .

وهكذا إذن يمكن ، بمجرد إبعاد أحد الكاشفين قليلاً عن الآخر ، أن يزداد احتمال الحادث المقصود ، أو أن يتناقص حتى ينعدم (تماماً كما كانت الحال في الانعكاس الجزئي عن سطحين)(*) .

لقد لجأنا في هذا المثال إلى ضرب سعتين جزئيتين ، إحداهما بالأخرى ، ثم إلى جمع حاصلي الضربين للحصول على السعة النهائية التي مربعها هو الاحتمال المنشود . ويجب أن لا ننسى أبداً ، مهما كان عدد الأسهم الواجب جمعها أو ضربها ، أن الهدف هو الحصول على سهم واحد ووحيد يمثل سعة الحادث المقصود . وأكثر الأخطاء التي يرتكبها طلاب الفيزياء المبتدئون إنما تأتي من قلة الانتباه إلى هذه الناحية . وبصادق القول أقول : إننا كثيراً ما ندعوهم إلى تحليل أمثلة لا تتناول سوى فوتون واحد ، إلى أن اختلط عندهم السهم بالفوتون ، مما أنساهم أن الأسهم هي في الحقيقة سعات الاحتمال ، وأن مربعها يمثل احتمال الحادث ، وهو عموماً حادث مركَّب(**) .

سأبدأ ، في المحاضرة القادمة ، بشرح مبسط لخواص المادة ، وسيقودني ذلك إلى أن أشرح لكم ، من ضمن ما أشرح ، من أين يأتي العدد المعهود 0,2 ، ولماذا يبدو أن الضوء أبطأ في الزجاج منه في الهواء ، إلخ . لأنني ، وهذا اعتراف صريح ، ارتكبت حتى الآن خداعاً كبيراً : الواقع أن الفوتونات لا تنزو (لا تنعكس) ، خلافاً لما قلت ، عن سطح الزجاج ، إنها تتفاعل مع الإلكترونات الموجودة في أحشاء الزجاج . سأريكم كيف تذهب الفوتونات من إلكترون لآخر ، وسترون عندئذ أن ظواهر الانعكاس والاختراق تنجم عن عملية يلتقط فيها الإلكترون فوتوناً ، فيتردد لحظة ثم يُصدر فوتوناً جديداً . لكن هذا لا يمنع أن التبسيط الذي خدمنا حتى الان لا يخلو من متعة .

(*) إن هذه الظاهرة ، المعروفة باسم مفعول هنبوري - براون - تويس ، تسمح في الفلك الراديوي - radio - astronomy بتمييز منبع وحيد عن منبع مضاعف .

(**) إن من الخير أن يكون هذا المبدأ العام دائم الحضور في الذهن إذا أردنا اجتناب الوقوع في كل أنواع الاختلاطات مثل «تقصير رزمة الأمواج» وسواها من المفعولات السحرية .

الفصل الثالث

الإلكترونات وتفاعلاتها

الإلكترونات وتفاعلاتها

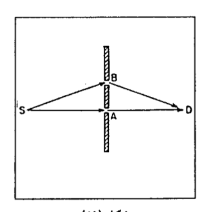
هاكم الآن ثالثة المحاضرات الأربع المخصصة لنظرية الإلكتروديناميك الكمومي ، ذلك الموضوع الصعب . ولما كنت أرى بوضوح ، هذا المساء ، حضور جمهور أكبر من ذي قبل ، أستنتج أن فيكم أناساً لم يكونوا هنا في المحاضرتين السابقتين ولن يفهموا شيئاً مما سأقوله اليوم . أما أولئك الذين أصغوا حقاً إلى المحاضرتين الأوليين فسيجدون في فهم محاضرة اليوم صعوبة لا تقل عن ذي قبل ، لكنهم يعلمون أن ذلك شيء طبيعي : ذلك أن طريقتنا في وصف الطبيعة هي ، كما ذكرت في المحاضرة الأولى ، طريقة غير مبررة عموماً.

أريد أن أتكلم في هذه المحاضرات عن الميدان الذي نعرفه أحسن معرفة في الفيزياء ، ألا وهو التفاعل بين الضوء والإلكترونات . فمعظم ما هو مألوف لديكم من ظواهر ناجم عن هذا التفاعل بين الضوء والإلكترونات ـ تلك مثلاً ، حال مجموعة الظواهر التي تُدرس في الكيمياء والبيولوجيا (علم الحياة) . ولا تشذ عن هذه النظرية سوى ظواهر الثقالة والعمليات النووية ، أما كل الباقي فمن اختصاصها . كنا ، في المحاضرة الأولى ، قد شعرنا بالحاجة إلى آلية مُرضية توضح لنا كيفية حصول الظواهر ، ولو أبسطها ، كالانعكاس الجزئي للضوء عن الزجاج . كما نفتقد أيضاً طريقة للتنبؤ عما إذا كان الفوتون سينعكس عن الزجاج أو سينفذ فيه . وكل ما نستطيع عمله هو حساب احتمال أن يقع الحادث المقصود ، أي الانعكاس هنا . (إن هذا الاحتمال يساوي 4% عندما يصل الضوء عمودياً على سطح الزجاج ، وهو يزداد إذا كانت زاوية السقوط على الزجاج مائلة) .

إن الاحتمالات العادية تستجيب لـ «قاعدتي التركيب» التاليتين : ١) إذا كان الحادث ممكن الوقوع بأساليب عديدة متاحة ، نجمع احتمالات كل واحد من هذه الأساليب (البدائل) ؛ ٢) إذا كان الحادث يقع في نهاية مراحل متوالية ، أو إذا كان وقوعه يتعلق بعدد من الشروط المستقلة ، عندئذ نضرب معاً احتمالات كل مرحلة من المراحل ، أو كل شرط من الشروط ، الضرورية لوقوع الحادث .

إننا ، في عالم الفيزياء الكمومية الممتع والمزخرف ، نحصل على قيمة الاحتمال بحساب مربع طول سهم : فحيث نتوقع ، في الظروف العادية ، أن نجمع الاحتمالات نلجأ إلى «جمع» أسهم ، وحيث نضرب الاحتمالات ، نلجأ إلى «ضرب» أسهم . لكن الأجوبة العجيبة التي نحصل عليها من حساب الاحتمالات بهذه الطريقة تتفق تماماً مع النتائج التجريبية . هذا وإن وجوب اللجوء إلى قواعد ومحاكمات على هذه الدرجة من الغرابة ، كي نفهم الطبيعة ، لـمما يغمرني بالسرور ويحبب إليّ أن أتحدث عنه إلى الناس . وليس وراء هذا التخيل للطبيعة آليات خفية أخرى ؛ فهاكم اليوم ما يجب أن تتقبلوه إذا أردتم فهم صاحبة الجلالة ، هذه الطبيعة! .

أحب أن أُريكم ، قبل أن أدخل في صلب الموضوع ، نموذجاً آخر لسلوك الضوء . وأُريد أن أتكلم عن ضوء ضعيف جداً ـ ليس أكثر من فوتون واحد في كل إصدار ـ وذي لون واحد صاف . (شكل ٤٩) . أضع بين المنبع S والكاشف D حاجزاً فيه ثقبان صغيران جداً ، A و B ، المسافة بينهما بضعة ميليمترات . (إذا كانت المسافة بين المنبع والكاشف قرابة متر واحد ، يجب أن لا يزيد قطر الثقب عن عُشر الميليمتر) لنضع A على استقامة DS ، فالثقب B ليس على المستقيم DS.



شكل (٤٩)

الثقبان الصغيران (A و B) ، في حاجز يقع بين منبع S وكاشف D ، يدعان كمية واحدة عملياً من الضوء (هنا 1%) تمر عبر كل منهما ، إذا كان أحدهما فقط هذا أو ذاك ، مفتوحاً . فإذا كانا مفتوحين معاً تحدث «تداخلات» : أي أن الكاشف «يتك» بنسبة تتراوح ، بحسب المسافة بين الثقبين ، بين الصفر و 4% ؛ انظر الشكل ٥١ (a).

إذا أغلقنا الثقب B نحصل على «تكات» في D تمثل الفوتونات التي مرت عبر الثقب A (لنقل إن الكاشف يصدر «تكة» مرة واحدة في المتوسط من أجل كل 100 فوتون تصدر تباعاً عن المنبع ، أي في 1% من عدد الفوتونات الصادرة في كل اتجاه) . وعندما نغلق A وتفتح B تعلمون ، منذ المحاضرة الثانية ، أن صِغَر الثقبين

يجعل عدد التكات الوسطى مساوياً أيضاً 1% . (عندما نُجبر الضوء على سلوك ممرٍّ ضيق جداً ، كما رأينا في تجربة الشكل (٣٤) ، فإن قوانين الضوء التقليدية - كذهاب الضوء في خط مستقيم - تصبح باطلة) ، لكننا ، عندما نفتح الثقبين معاً ، نحصل على نتيجة معقدة ، بسبب التداخل INTERFERENCE الذي يحدث : إذ ، من أجل فاصل معين بين الثقبين ، نحصل على تكات أكثر من الـ 2% المتوقعة (نسبتها العظمى 4% تقريباً) ، وإذا غيّرنا قليلاً هذا الفاصل يصمت الكاشف تماماً.

إن ما يحق لنا أن نتوقعه هو أن يؤدي فتح الثقب الآخر ، في كل الأحوال ، إلى مزيد من الضوء القادم إلى الكاشف ، لكن هذا لا يحدث في الواقع . فمن الخطأ إذن أن نقول بأن الضوء يمر «من هذا الطريق أو ذاك» . ومازال يُفلت مني أن أقول جملاً من قبيل «إنه يمر من هنا أو من هناك» ، لكن من المهم أن تتذكروا أنني ، بهذا القول ، أقصد وجوب جمع السعات (الأسهم) : إن للفوتون سعةً للمرور من هذه الجهة وسعة للمرور من الجهة الأخرى . وإذا تعاكست السعتان فإن الضوء لا يذهب إلى الكاشف ولو كان الثقبان مفتوحين معاً .

وإليكم الآن أيضاً ، من غرائب الطبيعة ، تصرُّفاً آخر أُحب أن أُحدثكم عنه . تصوروا (شكل ٥٠) أننا وضعنا كاشفين من نوع خاص - واحداً في A والآخر في B - يسمحان بتحديد الثقب الذي يمر منه الفوتون عندما يكون الثقبان مفتوحين (يمكن صنع كاشف يعلن عن مرور الفوتون به) . ولما كان احتمال أن يذهب الفوتون من S إلى D (شكل ٥٠) متعلقا بالمسافة بين الثقبين ، فإن على الفوتون أن يجد في الخفاء طريقة للانقسام إلى نصفين يعودان بعدئذ إلى الالتحام . هل توافقون؟ في هذه الفرضية يجب على الكاشفين ، عند A و B ، أن «يتكا» معاً على الدوام (ربما نصف عدد المرات؟) في حين أن الكاشف D «يتك» باحتمال يتراوح بين الصفر و 4% ، بحسب المسافة بين A و B.

شكل (٥٠)

عندما نضع عند كل من A و B كاشفاً خاصاً ينبىء عن الثقب الذي مر عبره الفوتون ، والثقبان مفتوحان ، تتغير نتيجة التجربة . ولما كان الفوتون الواحد ، في حال مراقبة الثقبين بالكاشفين ، يمر من هذا الثقب أو ذاك ، فاننا نحصل على إحدى النتيجتين التاليتين : ١) الكاشفان في A و D «يتكان» ، أو ٢) الكاشفان في B و D «يتكان» . واحتمال وقوع كلٍ من هذين الحادثين يساوي قرابة 1% . نجمع احتمالي هذين الحادثين جمعاً حسابياً فنجد احتمال أن «يتك» D ، هو 2% ؛ انظر الشكل ٥١ (b).

S
D
A*
B*
* كاشفان خاصان

لكن الذي يحـدث في الواقع هو مـا يلي : إن الكاشـفين ،عند A و B ،لا «يتكان» أبداً معاً ،إما أن «يتك» A أو «يتك» B . إن الفوتون لا ينقسم إذن ؛ بل يمر من هذه الجهة أو من تلك .

زد على ذلك أن الكاشف D ، في هذه الظروف ، «يتك» مرتين في المئة ، وهي نسبة تساوي ببساطة مجموع احتمالي أن «يتك» A وأن «يتك» B (1%+1%). وهذه النسبة ، 2% ، لا تتغير بتغير المسافة بين A و B ، أي أن التداخل يزول عندما نضع كاشفاً عند كل من A و B ؛ شيء عجيب! .

إن الطبيعة قد تدبرت أمرها جيدًا بحيث تمنعنا من معرفة طريقة عملها: عندما نضع أجهزة وظيفتها أن تتنبأ عن الطريق الذي اختاره الفوتون نحصل على الجواب المنشود ، لكن مفعولات التداخل الرائعة تزول! وإذا لم نضع تلك الأجهزة ، أي إذا تخلينا عن معرفة طريق الفوتون ، فإن مفعولات التداخل تعود إلى الوجود! أليس هذا غريباً جداً!؟ .

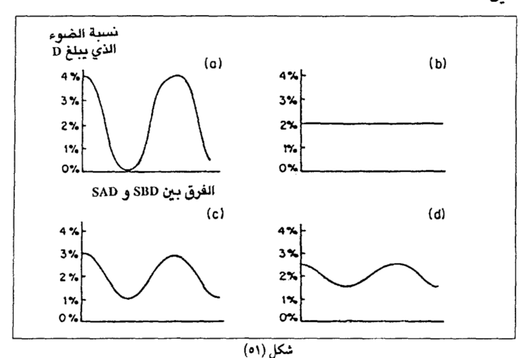
ولفهم هذه المفارقة أُذكركم بمبدأ هام جداً : إن الحساب الصحيح لاحتمال الحادث يستدعي بذل عناية كبيرة في التحديد الواضح للحادث بكامله ـ لاسيما الشروط البدئية والنهائية للتجربة . فتُفحص التجهيزات قبل التجربة وبعدها وما تغير في أثناء ذلك كله . فعندما استهدفنا احتمال ذهاب الفوتون من S إلى D بدون كاشفين في A و B ،كان الحادث ببساطة : الكاشف «يتك» مرة واحدة . ولما كان التغير الوحيد في االظروف هو صدور التكة عن D ،لم نكن نملك وسيلة لمعرفة الجهة التي مر منها الفوتون وحصل تداخل .

لكننا غيَّرنا ظروف المسألة عندما وضعنا الكاشفين عند A و B ،فأصبحنا نعالج حالة حادثين كاملين ـ مجموعتين من الظروف البدئية ـ وهما متمايزان : ١) الكاشفان ، في A و D «يتكان» ، أو ٢) الكاشفان في B و D «يتكان» . فعندما يتاح ، في تجربة ما ، عدد من الظروف النهائية ، يتوجب علينا أن نحسب احتمال كل ظرف وكأنه حادث منفصل كامل .

فلحساب سعة أن «يتك» الكاشفان في A و D يجب ضرب السهمين المتعلقين بالمرحلتين التاليتين : الفوتون يذهب من S إلى A ، ثم من A إلى D حيث «يتك» الكاشف . وبتربيع السهم الحصيلة نجد احتمال هذا الحادث ـ 1% ـ ولا تختلف ظروف هذا الحادث عن الظروف السائدة عندما كان الثقب B مغلقاً ،لأن

كلا من هاتين الحالتين تنطوي على المرحلتين نفسيهما ، ويُحسب احتمال الحادث الآخر بالطريقة نفسها ، 1%.

وإذا لم نهتم إلا بتكة الكاشف D فقط ، وتخلينا عن معرفة أي الكاشفين ، A أم B ، «يتك» في أثناء ذلك ، نحصل على الاحتمال المنشود بجمع احتمالي الحادثين ، فنجد 2% . ولو بقي شيء في الجملة نستطيع رصده ، من حيث المبدأ ، لنعلم من أي جهة مر الفوتون ، نكون أمام حالتين نهائيتين متمايزتين (ظرفين نهائيين مختلفين) ، ويجب جمع احتمالي كل من الحالتين النهائيتين ، لا جمع السعتين(*).



شكل (٥١)

في غياب الكاشفين الخاصين عن A و B يوجد تداخل : كمية الضوء الواصلة إلى D تتغير بين الصفر و 4% (a) . وبوجود كاشفين موثوقين تماماً لا يوجد تداخل ، فتكون كمية الضوء الواصل إلى D ثابتة ، وهي هنا 2% (b) ، أما إذا كان الكاشفان رديئين (أي أن الواحد منهما قد لا «يتك» عندما يمر به الفوتون) ، نصبح أمام بدائل ثلاثة : A و D يتكان ، أو B و D يتكان ، أو يتك D وحده . يكون عندئذ المنحنى الحاصل مزيجاً مؤلفاً من إسهامات كل من هذه الظروف النهائية الثلاثة الممكنة . وكلما نقصت الثقة في الكاشفين ، في A و B ، يزداد عدد التداخلات . إن الثقة في هذين الكاشفين أقل في حال (c) منها في حال (d) . إن المبدأ الذي يحكم التداخل هو التالي : نحسب بصورة مستقلة احتمال كل واحد من مختلف الظروف النهائية الممكنة بجمع الأسهم ويأخذ مربع طول السهم الحصيلة ؛ وبعدئذ نجمع شتى الاحتمالات بالطريقة المعتادة .

(*) ونهاية القصة أكثر عجباً : إذا كان الكاشفان في A و B رديئين ، يصمتان أحيانا رغم مرور الفوتون بهما ، نصبح أمام ثلاثة ظروف نهائية : ١) الكاشفان في A وفي D «يتكان» ، ٢) الكاشفان في B و D «يتكان» ٣) الكاشف في D «يتك» وحده ، في حين يصمت A و B (يظلان في الحالة البدئية) . يحسب عندئذ احتمالا الحادثين الأوليين بالطريقة المشروحة أعلاه (سوى أنه يوجد الآن مرحلة إضافية ـ تصغير احتمال أن «يتك» الكاشف [Aأو B] ، لأن الكاشفين رديئان) ، وعندما «يتك» D، وحده ، لا نستطيع فصل الحادثين ، وتتلاعب بنا الطبيعة بإحداث تداخل ، كأن الكاشف الذي صمت غير موجود (سوى أن السهم النهائي يصغر بنسبة سعة أن يصمت الكاشفان) . وتكون النتيجة مزيجاً ، مجرد مجموع الحالات الثلاث شكل (٥١) . ولو ازدادت موثوقية الكاشفين لتضاءلت التداخلات .

لقد أبرزت لكم هذه الأشياء كي تروا أننا كلما ازددنا اكتشافاً لتصرفات الطبيعة ازدادت الصعوبة في صنع نموذج يفسر مجريات ظواهرها بصدق، مهما كانت بسيطة. ولذلك تخلى الفيزيائيون عن محاولاتهم بهذا الصدد.

وبالعودة إلى موضوعنا، تذكروا أنني أريتكم في المحاضرة الأولى كيف يمكن للحادث أن يقع بعدة أساليب، وكيف يمكن «جمع» الأسهم المتعلقة بكل واحد من هذه الأساليب. ثم رأيتم، في المحاضرة الثانية، كيف نستطيع تقسيم كل أسلوب إلى مراحل متوالية، وكيف أمكن اعتبار السهم المتعلق بكل مرحلة نتيجةً لتحويل نُجريه على السهم الواحدي، وكيف نستطيع ـ بالتصغير والتدويرمرحلة فمرحلة ـ أن «نضرب» الأسهم المتعلقة بكل مرحلة. فأنتم إذن متعودون الآن على القواعد المرعيّة في رسم الأسهم (التي تمثل حوادث بسيطة) والتعامل معها للحصول على سهم نهائي مربعه احتمال الحادث الفيزيائي المقصود.

ومن الطبيعي أن نتساءل إلى أي حد يمكن أن نستمر في عملية تحليل الحوادث إلى حوادث تحتية أكثر فأكثر بساطة. فما هي الحوادث الأكثر بساطة، الأكثر عنصرية؟ وهل هو محدود عدد هذه الحوادات العنصرية، التي تتيح بتضافرها تشكيل كل الظواهر التي تتناول الضوء والإلكترونات؟ وبتعبير مجازي: هل يوجد، في لغة الإلكتروديناميك الكمومي، عدد محدود من «حروف» تتيح بشتى تشكيلاتها صنع «الكلمات» و «الجمل» التي تصف كل الظواهر المرصودة في الطبيعة تقريباً؟.

الجواب هو نعم: هذا العدد هو ثلاث. لا يوجد سوى ثلاثة آليات أساسية لازمة لتشكيل كل الظواهر الضوئية والإلكترونية.

وقبل أن أعرض لكم هذه القطع الأساسية، عليَّ أن أُعرفكم بالممثلين على مسرح تلك العمليات. إنها الفوتونات والإلكترونات. لقد ناقشت بالتفصيل موضوع الفوتونات، جسيمات الضوء، في المحاضرتين الأوليين. أما الإلكترونات فقد تم عام ١٨٩٥ اكتشافها كجسيمات يمكن عدها، ويمكن وضع واحد منها على قطرة زيت وقياس شحنته الكهربائية. وشيئاً فشيئاً تبين أن حركة هذه الجسيمات هي التي تولد التيار الكهربائي في الأسلاك.

وبعد اكتشاف الإلكترونات بقليل، تخيل الناس أن الذرات تشبه منظومات شمسية صغيرة مؤلفة من جزء مركزي ثقيل (أسموه النواة) ومن إلكترونات خفيفة تدور حول النواة في «أفلاك» كما تدور الكواكب حول الشمس. فاذا ظننتم أن

الذرات مصنوعة هكذا، فأنتم في عام ١٩١٠ . ثم تخيل لوي دو بردي L. de. Broglie ،عام ١٩٢٤ ، أن للإلكترونات مظهراً موجياً أيضاً ، وبعد ذلك بقليل أثبت ديفيسون C.J. Davisson وجرمر L.H. Germer ، من مختبرات بل Bell ، برجم بلورة نيكل بإلكترونات ، أن الإلكترونات تنزو (كالأشعة السينية) وفق زوايا على هواها وأن بالامكان حساب طول موجة الإلكترون بقانون أعطاه دوبروي .

عندما نفحص الفوتونات على مسار طويل - أطول من المسار المتعلق بدورة من دورات عقرب المزمان التخيلي - نستطيع أن نشرح الظواهر الملحوظة ، وبشكل تقريبي جيد جداً ، بقواعد مثل : «الضوء يذهب في خط مستقيم» ، لأن هناك من عدد الطرق ما يكفي ليجعل سعاتها تتعزز بالتضافر في جوار الطريق ذي الزمن الأصغري ، وتتفانى في غير ذلك . لكن عندما تكون الفسحة التي يمر عبرها الضوء ضيقة جدا (كالمرور من الثقبين في تجربة الشكل ٥٠) فإن تلك القواعد تصبح باطلة - نلحظ أن الضوء لا يذهب لزاماً في خط مستقيم ، وأن الثقبين يولدان تداخلاً ، إلخ . ويحدث الشيء ذاته مع الإلكترونات : فلدى فحصها في مدى كبير نرى أنها تتحرك كجسيمات ، على مسارات محددة تماماً . أما في المدى الصغير ، كما في الذرة مثلا ، فالفسحة صغيرة لدرجة أن لا يوجد مسار رئيسي ، أن لا يوجد «فلك» . فكل أنواع المسارات متاحة للإلكترون ، ولكل مسار سعة . وهنا يصبح التداخل عظيم الأهمية جداً ، ولابد لنا من جمع الأسهم كي نتنبأ بحظوظ الأمكنة التي يمكن أن يوجد فيها الإلكترون .

وقد يكون من المفيد أن نلاحظ أن الإلكترونات كان لها ، في بدء اكتشافها ، مظهر جسيمات ، وأن المظهر الموجي لم يُكتشف إلا في وقت متأخر . ومن جهة أخرى ، إذا تجاهلنا ما كان يعتقده نيوتن ، لكن لأسباب رديئة ، من أن الضوء «جسيمي» ، فقد تجلى أول الأمر بسلوك موجي ولم تُكتشف خصائصه الجسيمية إلا فيما بعد . إن الإلكترونات والضوء ينطوي سلوكها على سمات كل من الجسيمات والأمواج بعض الشيء . وللاستغناء عن اختراع اسم مركب ، مثل «جسيجة» ، نستمر في تسمية هذه الأجسام بـ «جسيمات» ، لكننا نعلم جميعا أنها تخضع في سلوكها لقواعد شرحتُها لرسم الأسهم والتعامل معها . وقد ثبت أن كل الجسيمات التي صنعتها الطبيعة - الكواركات quarks ، الغليونات glouns ، النترينوات neutrinos ، إلخ (التي سنتكلم عنها في المحاضرة التالية) - تتصرف بهذا الشكل الكمومي . والآن أقدم لكم الأشياء الثلاثة الأساسية التي ينتهجها هذان الممثلان ، الفوتون والإلكترون ، في توليد الظواهر الضوئية والإلكترونية على مسرح الطبيعة .

ـ النهج رقم ١ : الفوتون يذهب من مكان لآخر .

ـ النهج رقم ٢ : الإلكترون يذهب من مكان لآخر .

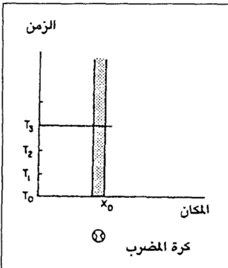
ـ النهج ٣ : الإلكترون يُصدر أو يمتص فوتوناً.

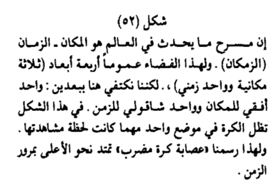
لكل نهج سعة (سهم) خاصة به تُحسب بموجب قواعد محددة . وسأقول لكم ما هي هذه القواعد ، القوانين التي نستطيع أن نبني العالم (باستثناء الثقالة ونوى الذرات كالعادة!) على أساسات منها . إن المسرح الذي ستتوالى عليه هذه النهوج لن يكون بعد الآن المكان (الفضاء) وحده ، بل المكان والزمان . وقد أهملتُ حتى الآن الاعتبارات الزمنية (كالاهتمام بمعرفة أوقات صدور الفوتونات عن المنبع ووصولها إلى الكاشف ، مثلاً) . ورغم أن الفضاء المألوف ذو ثلاثة أبعاد فسأعمد إلى الاقتصار على بعد واحد منه في البيانات التخطيطية التي سأرسمها : سأحمل على محور أفقي موقع الحادث المدروس ، وأحمل على محور شاقولي زمن وقوعه .

وأول شيء سأُمثله في المكان والزمان ـ أو الزمكان ، كما سأقول غالباً ـ حالة كرة مضرب ساكنة (شكل ٥٢) . ففي صباح الخميس مثلا ، وفي لحظة ما أدعوها T_0 ، تحتل الكرة حيزاً من الفضاء أدعوه X_0 ، وبعد برهة ، في اللحظة T_1 ، تحتلُّ المكان نفسه لأنها ساكنة . وكذلك ، في لحظات لاحقة ، T_2 ، T_3 ، . . تظل في X_0 . فبيان كرة المضرب الساكنة هو إذن عصابة شاقولية تمتد نحو الأعلى . وماذا يحدث ، إذا كانت الثقالة غير موجودة ، لكرة مضرب ذاهبة نحو جدار شاقولي؟ لنقل إنها تنطلق من X_0 في اللحظة T_0 من صباح الخميس (شكل ٥٣) ، لكنها بعد قليل لن تكون في المكان نفسه ، بل منحرفة قليلا نحو X_1 . وباستمرارها على هذا النحو تولِّد «عصابة كرة مضرب» مائلة في الزمكان . وعندما تصدم الجدار (وهو ، بسبب سكونه ، يتمثل بعصابة شاقولية) تنزو عنه في الاتجاه الاخر لتعود بالضبط إلى إحداثي نقطة انطلاقها (X_0) ، ولكن في لحظة لاحقة T_6.

وفيما يخص سُلَّم الزمن ، يكون من الأجدى أن نقيسه ، لا بالثواني ، بل بوحدات أصغر بكثير . وبما أننا نهتم بفوتونات وإلكترونات ذات حركة سريعة جدًا ، سأمثل شيئًا يسير بسرعة الضوء وبميل يساوي 45° . فمن أجل جسيم يذهب من T_1X_1 ، مثلاً إلى X_2 T_2 بسرعة الضوء تكون المسافة الأفقية من X_1 إلى X_2 مساوية المسافة الشاقولية بين T_1 و T_2 (شكل ٥٤) . ويرمز عادة بـ c لعامل مرور الزمن (كي يتولَّد المستقيم المائل بزاوية 45° عن جسيم يسير بسرعة الضوء) ، وهذا

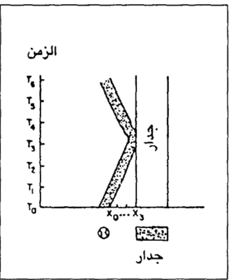
العامل وارد في جميع دساتير أينشتاين، وسبب وجوده أننا نعتمد الثانية الزمنية كوحدة لقياس الزمن بدلا من أن نعتمد الفترة التي يستغرقها الضوء لقطع مسافة متر واحد .





شكل (٥٢)

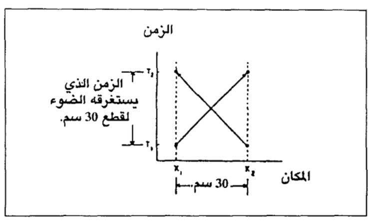
إن مسرح ما يحدث في العالم هو المكان ـ الزمان (الزمكان) . ولهذا الفضاء عموماً أربعة أبعاد (ثلاثة مكانية وواحد زمني) ، . لكننا نكتفي هنا ببعدين : واحد أفقي للمكان وواحد شاقولي للزمن . في هذا الشكل تظل الكرة في موضع واحد مهما كانت لحظة مشاهدتها . ولهذا رسمنا «عصابة كرة مضرب» تمتد نحو الأعلى بمرور الزمن .



شكل (٥٣)

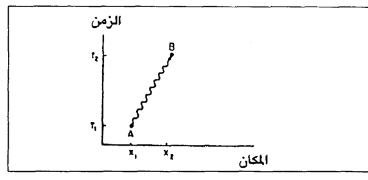
إن كرة المضرب التي تذهب نحو جدار ثم ترتد عنه نحو موضعها الأولي (المرسوم تحت البيان) تتطور في بعد واحد وتتمثل بـ «عصابة كرة مضرب» مائلة . في اللحظتين T_1 و T_2 تقترب الكرة من الجدار ، وفي T_3 تضربه وتنطلق في طريق عودتها .

لندرس الآن النهج الأساسي الأول ـ فوتون يذهب من نقطة لأخرى ـ بالتفصيل . سأمثل هذا النهج ـ بلا سبب مُلزم ـ بخط متموِّج يذهب من A إلى B. ويجب أن أنتبه أكثر وأن أقول بالأحرى إن الفوتون ، الذي نعلم أنه موجود في مكان ما في لحظة معينة ،له سعة احتمال في أن يوجد في مكان آخر في لحظة أخرى . وعلى بياني التخطيطي الزمكاني (شكل ٥٥) يكون للفوتون في النقطة A ـ التي إحداثياها X_1 و T_1 ـ سعة احتمال للظهور في النقطة B (T_2 ,X_2) سأرمز لقيمة هذه السعة بـ P (A إلى B).



شكل (٥٤)

في وحدات الزمن التي أستخدمها في هذه البيانات تتمثل الجسيمات السائرة بسرعة الضوء بمستقيم ميله في الزمكان 45°. ولكي يقطع الضوء مسافة 30 سنتيمتراً ـ من X_1 إلى X_2 أو من X_2 إلى X_1 ـ يستغرق قرابة جزء من مليار جزء من الثانية .



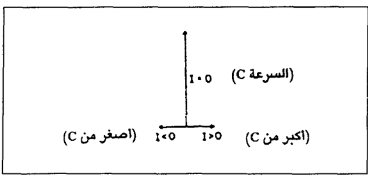
شكل (٥٥)

إن للفوتون (الذي نمثل مساره بخط متموج) سعة احتمال للذهاب ، في الزمكان ، من نقطة A إلى نقطة B .تُحسب هذه السعةو التي أسميها P (A إلىB) بدستور لا يتعلق إلا بالفاصل المكاني $(X_2 - X_1)$ والفاصل الزمني $(T_2 - T_1)$. وهذا الدستور تابع بسيط ، أي هو فرق مربعيهما ، ونسميه «المجال» ونرمز له بـ I ويكتب كما يلي : $(X_2 - X_1)^2 - (T_2 - T_1)^2$

يوجد دستور يعطي طول السهم المتعلق بـ P (A إلى B) . وهو أحد القوانين الكبرى للطبيعة وبسيط جداً . إنه يتوقف على الفروق المسافية والفروق الزمنية بين النقطتين A و B . والصيغ لهذه الفروق هي $(X_2 - X_1)$ و $(T_2 - T_1)$(*) (إقرأ من اليسار إلى اليمين : X_1 مطروح من X_2 ،...).

(*) في هذه المحاضرات أمثل على المحور X موقع نقطة في فضاء ذي بعد واحد ، ولتعيين موضع في نقطة الفضاء ذي الأبعاد الثلاثة ، يجب أن أتخيل «علبة» وأن أقيس أبعاد النقطة عن قعر العلبة وعن جدارين متجاورين (هذه الوجوه مستويات متعامدة) لنرمز بـ X_1 وY_1 وZ_1 لهذه الأبعاد (تسمى إحداثيات) . إن المسافة بين هذه النقطة ونقطة أخرى إحداثياتها X_2وY_2و Z_2 تُحسب من نظرية فيثاغورس في الأبعاد الثلاثة ، أي أن مربع هذه المسافة يساوي : $(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2$ أما الفرق بين هذا المربع ومربع الفرق الزمني ، أي $(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2 - (T_2 - T_1)^2$ فيسمى أحيانا «المجال INTERVAL» ورمزه I ، وتقول نظرية اينشتاين النسبوية إن P(A إلى B) ، يجب أن يتعلق بهذه المضمومة . أما أكبر إسهام في السهم الحصيلة المتعلق بـ P (A إلى B) فيحصل عليه حقاً، كما يمكن أن نتوقع ، عندماتكون المسافة المكانية مساوية الفرق الزمني ، أي عندما يكون I معدوما . لكن هنالك ، في حال انعدام I ، إسهام إضافي وتناسب عكسي مع I ، ويتجه نحو الساعة الثالثة عندما يكون I موجبا (عندما يسير الضوء باسرع من c) ، ونحو الساعة التاسعة عندما يكون I سالبا . وفي أحيان كثيرة يتفانى هذا الإسهامان بتعديل أحدهما للآخر (شكل ٥٦).

وكما نتوقع نحصل على أكبر إسهام في P (A إلى B) عندما يتحرك الفوتون بسرعة الضوء العادية - عندما يكون ($X_2 - X_1$) مساويا ($T_2 - T_1$) - لكن يوجد أيضا سعة كي يسير الضوء بسرعة أكبر (أو أصغر) من سرعته المعهودة (في الخلاء). وهكذا، وبعد أن تعلمتم في المحاضرة السابقة أن الضوء لا يذهب في خط مستقيم، ترون الآن أنه يسير دوما بالسرعة ذاتها!.



شكل (٥٦)

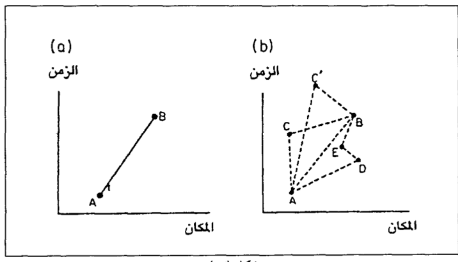
إذا كان الضوء يسير بالسرعة c ،ينعدم المجال I ونحصل على إسهام كبير يتجه نحو الساعة ١٢ - وإذا كان I موجباً نحصل على إسهام يتجه نحو الساعة ٣ ويتناسب عكسيا مع I؛ وعندما يكون I سالباً نحصل على إسهام صغير يتجه نحو الساعة ٩. وعلى هذا يكون للضوء سعة غير معدومة للذهاب بسرعة أكبر من c أو أصغر، لكن هذه السعات تنعدم عندما تكون المسافات المقطوعة كبيرة.

ربما كانت مفاجأة لكم أن توجد سعة كي يسير الفوتون بسرعات أكبر أو أصغر من السرعة المعهودة c. إن الأسهم المتعلقة بهذه الإمكانيات صغيرة جداً بالنسبة للأسهم المتعلقة بالسرعة c والواقع أنها تنعدم عندما يقطع الضوء مسافات طويلة. أما من أجل مسافات قصيرة - كما في بعض البيانات التي سأرسمها - يصبح لهذه الإمكانيات أهمية جوهرية ويجب أخذها في الحسبان.

تلك إذن حال النهج الأساسي الأول، قانون الفيزياء الأول - الفوتون يذهب من نقطة لأخرى. إنه يفسر كل علم الضوء، نظرية الضوء برمتها! ليس تماماً بصادق القول: فقد تركت الاستقطاب جانبا (كالعادة)، وتفاعل الضوء مع المادة، وهذا ما يقودني إلى القانون (النهج) الثاني.

النهج الأساسي الثاني في الإلكتروديناميك الكمومي هو :الإلكترون يذهب في الزمكان من النقطة A إلى النقطة B. (تصوروا، للحظة، إلكتروناً وهمياً ،مبسطاً دون استقطاب - وهو ما يسميه الفيزيائيون إلكترونا «سبينه spin صفر». إن للإلكترونات في الحقيقة نوعاً من الاستقطاب، وهذا لا يضيف شيئاً إلى الأفكار

الأساسية ؛ وكل ما هنالك أنه يعقد الدساتير قليلا) ودستور سعة هذا النهج ، التي أرمز لها بـ E (من A إلى B) ، تتعلق أيضا بـ ($X_2 - X_1$) و ($T_2 - T_1$) (بما يشبه ما شرحناه في الحاشية ٢) ، وكذلك بعدد أرمز له بـ n ، وهو عدد نعينه بحيث تتفق حساباتنا مع التجربة . (سنرى فيما بعد كيف نحصل على قيمة n) . وهو دستور معقد بعض الشيء وأنا آسف لعجزي عن أن أشرحه لكم بلغة بسيطة ولكن قد يهمكم مع ذلك أن تعلموا أن صيغة P (A إلى B) - المتعلقة بفوتون يذهب من موضع لآخر في الزمكان - تصبح مطابقة تماما لصيغة E (A إلى B) - إلكترون يذهب من موضع لآخر - إذا وضعنا n مساويا الصفر في هذه الصيغة(*).



شكل (٥٧)

للإلكترون سعة ، سميها E (A إلى B) ، للذهاب من نقطة لأخرى في الزمكان ، ورغم أنني أمثل E (A إلى B) بخط مستقيم بين نقطتين (a) ، نستطيع أن نتخيلها كمجموع عدة سعات (b) - منها سعة أن يغير الإلكترون اتجاهه في الزمكان (أي أن تتغير سرعته في المكان قيمةً أو اتجاهاً) عند النقطة C أو C' ، على طريق ذي «قفزتين» ، ومنها أيضاً سعة أن يغير اتجاهه في D وفي E ، على طريق ذي «ثلاث قفزات» - بالإضافة إلى الطريق المباشر من A إلى B . ويمكن أن تحدث ، من هذا القبيل ، تغيرات عددها غير محدود (بين الصفر واللانهاية) ، بـ «محطات» لا تُحصى بين A وB . إن E (A إلى B) ينطوي على كل هذه الإسهامات مهما كان عددها .

(*) إن صيغة E (A إلى B) معقدة ، لكن من المفيد شرح مغزاها . يمكن أن نمثل E (A إلى B) كمجموع هائل يتناول العدد الكبير من الأساليب المتاحة للإلكترون كي يذهب من A إلى B في الزمكان (شكل ٥٧) : يستطيع الإلكترون أن «يعبر بقفزة واحدة» كي يذهب مباشرة من A إلى B ، ويستطيع أن «يعبر بقفزتين» مارا بـ «محطة» مرحلية في C ؛ ويستطيع أن «يعبر بثلاث قفزات» و «محطتين» في E, D ..لخ . وبموجب هذا التحليل تكون سعة كل «قفزة» - من نقطة F إلى أخرى G - هي P (F إلى G) ، أي نفس سعة مرور الفوتون من F إلى G. والسعة المتعلقة بكل محطة هي n^2 ، و n هو العدد الذي ذكرته أعلاه (العدد الذي يستخدم للتوفيق بين نتائج الحسابات والنتائج التجريبية) .
إن صيغة E (A إلى B) تتجلى على شكل سلسلة حدود من الشكل : P (A إلى D) (قفزة واحدة) + P (A إلى C) × n^2 × P (C إلى B) (قفزتان ومحطة في C) + P (A إلى D) × n^2 ×P (D إلى E) × n^2 × P (E إلى B) (ثلاث قفزات ومحطتان في D و E) + . . . من أجل كل النقاط المرحلية الممكنة : E, D, C . .لخ .
لاحظ أنه كلما كان n كبيرا كان إسهام الطرق اللامباشرة في السهم النهائي كبيراً . وعندما ينعدم n (كما في حال الفوتون) تختفي كل الحدود التي تحوي n ، فلا يبقى سوى الحد الأول P (A إلى B) ، وهكذا نرى أن بين السعتين ، E (A إلى B) و P(A إلى B) علاقة وثيقة .

النهج الأساسي الثالث : الإلكترون يُصدر أو يمتص (لا يهم) فوتوناً ،سأسمي هذا النهج «تواصلا junction» أو «اقتراناً coupling» ؛ ولتمييز طريق الإلكترون عن طريق الفوتون أمثل طريق الإلكترون بخط مستقيم في الزمكان . فكل اقتران هو إذن تواصل بين خطين مستقيمين وخط متموج (شكل ٥٨) وصيغة سعة إصدار الفوتون أو امتصاصه ، من قبل الإلكترون ، ليست معقدة ؛ فهي لا تتعلق بشيء - إنها مجرد عدد! سأرمز لهذا العدد بـ j ، وهو يساوي تقريبا 0.1- (سالب) ، فمفعوله إذن تصغير للسهم إلى عشر طوله وتدويره نصف دورة(*) .



(شكل ٥٨)
إن للإلكترون (وتمثل مساره بخط مستقيم) سعة معينة كي يُصدر ، أو يمتص ، فوتوناً (مساره الخط المتموج) . ولما كان للإصدار والامتصاص سعة واحدة أسمي أياً منهما «اقتراناً» . وسعة الاقتران عدد بحت أرمز له بـ j ، وهو يساوي 0.1- ،من أجل الالكترون (ويسمى أحياناً «الحمولة») .

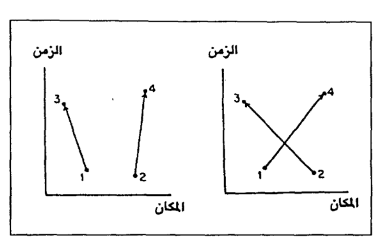
وهكذا انتهى الكلام عما يخص النهوج الثلاثة الأساسية - باستثناء تعقيدات طفيفة ناجمة عن ذلك الاستقطاب الذي أهملناه . ومهمتنا الآن أن نُركِّب هذه النهوج لتمثيل مسرحيات معقدة .

لنحسب ، كمثال أول ، احتمال أن يذهب إلكترونان ، موجودان في النقطتين 1 و2 من الزمكان ، إلى النقطتين 3 و4 (شكل ٥٩) . يمكن لهذا الحادث أن يقع بأساليب عديدة . أولها أن يذهب الإلكترون ، المنطلق من 1 ، إلى 3 - سنبدل ، في الصيغة E (A إلى B) A بـ 1 وB بـ 2 فنكتب E (1 إلى 2) - وأن يذهب الإلكترون الآخر من 2إلى 4 - يتعلق به E (2 إلى 4) . إنهما «حادثان فرعيان» يقعان معاً ، فيجب إذن ضرب سهميهما للحصول على السهم المتعلق بهذا الأسلوب الأول المتاح لوقوع الحادث . نكتب إذن الجداء E (1 إلى 3) × E (2 إلى 4) للحصول على السهم المتعلق بـ «الأسلوب الأول» .

يمكن للحادث نفسه أن يقع بأسلوب ثان : أن يذهب الإلكترون الأول من 1 إلى 4 ، والآخر من 2 إلى 3 - أيضاً حادثان فرعيان مترافقان . يكون السهم الحاصل الناجم عن «الأسلوب الثاني» مساوياً الجداء E (1 إلى 4) × E (2 إلى 3) ، فنجمعه مع السهم المتعلق بالأسلوب الأول لنحصل على السهم النهائي المتعلق بالحادث المقصود(**) .

(*) هذا العدد ، أي سعة إصدار الفوتون أو امتصاصه ، يدعى أحيانا «شحنة» الجسيم ، أو «حمولته» CHARGE

(**) لو كان علي أن آخذ استقطات الإلكترون في الحسبان لوجب أن أطرح السهم المتعلق بـ «الأسلوب الثاني» ، أي أن أعكس اتجاهه وأضيفه إلى سهم «الأسلوب الأول» (سنعود إلى هذه النقطة فيما بعد) .



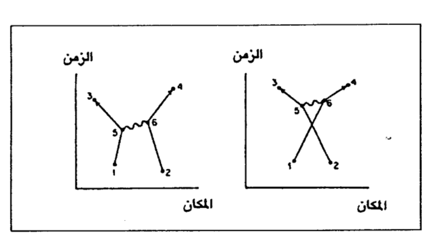
شكل (٥٩)

لكي نحسب احتمال أن يصل الإلكترونان المنطلقان من النقطتين 2 و1 في الزمكان إلى النقطتين 3 و4 يجب أن نحسب السهم الناجم عن الأسلوب الأول (المروران من 1 إلى 3 ومن 2 إلى 4) بمقتضى الوصفة التي تعطي E (A إلى B). نحسب بعدئذ السهم الناجم عن الأسلوب الثاني (المروران من 1إلى 4 ومن 2 إلى3) . وأخيراً نجمع هذين السهمين، فنحصل على السهم النهائي بتقريب جيد . (هذا صحيح من أجل إلكتروننا الوهمي ، المبسط الذي «سبينه صفر» . وإذا أخذنا استقطاب الإلكترون بالحسبان يصبح علينا أن نطرح أحد السهمين من الآخر بدلاً من أن نجمعهما) .

وبذلك نحصل على قيمة تقريبية جيدة لسعة الحادث . ولإجراء حساب أدق ، ذي اتفاق أحسن مع النتائج التجريبية ، يجب التفكير بأساليب أخرى متاحة لوقوع الحادث . هناك مثلاً ، في كل من الأسلوبين الرئيسيين المحسوبين أعلاه ، احتمال أن يندفع أحد الإلكترونين نحو «أرض موعودة» أخرى ويصدر فوتوناً (شكل ٦٠) . وفي أثناء ذلك قد يتاح للإلكترون الآخر أن يمتص في طريقه ذلك الفوتون . تُحسب عندئذ سعة أول هذين الأسلوبين الجديدين بضرب سعة أن يذهب إلكترون من 1 إلى 5 أولاً (حيث يُصدر فوتوناً) بسعة أن يذهب بعدئذ من 5 إلى 3 ، ومن ثم بسعة أن يذهب الإلكترون الآخر من 2 إلى 6 (حيث يمتص ذلك الفوتون) وبسعة أن يذهب بعدئذ من 6 إلى 4 . ويجب طبعاً أن لاننسى سعة ذهاب الفوتون من 5إلى 6 . وهاكم الصيغة الرياضية جداً في حساب سعة وقوع الحادث بهذه الطريقة الجديدة ، فاتبعوني (من اليمين إلى اليسار) .

E (1 إلى 5) × j × E (5 إلى 3) × E (2 إلى 6) × j × E (6 إلى 4) × P (5 إلى 6)،
إنها سلسلة تصغيرات وتدويرات متوالية . (أترك لكم أن تجدوا الصيغة من أجل أسلوب رابع ، مشتق من الأسلوب الثاني ، بمحطتي إصدار فوتون وامتصاصه ، ويذهب فيه إلكترون من 1 إلى 4 والآخر من 2 إلى 3)(*) .

(*) إن الظروف النهائية للتجربة المتعلقة بتلك الأساليب الاعقد هي نفس الظروف النهائية للأسلوبين المباشرين - الإلكترونان ينطلقان من 1 و 2 ويصلان إلى 3 و 4 - مما يجعلنا عاجزين عن التمييز بين الأسلوبين المباشرين وبين الأسلوبين غير المباشرين . ولذلك يجب أن نجمع السهم الحاصل عن الأسلوبين المباشرين مع السهم الحاصل عن غير المباشرين .



شكل(٦٠)

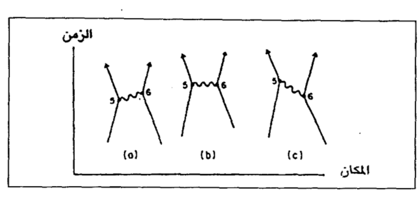
يوجد «أسلوبان آخران» متاحان لوقوع الحادث المذكور في الشكل ٥٩ ، في كل منهما يصدر فوتون في 5 ويُمتص في 6. والظرفان النهائيان هنا غير متخلفين عما جاء في أسلوبي الشكل ٥٩ المباشرين ـ إلكترونان لدى الإنطلاق ، إلكترونان لدى الوصول ـ فلا فرق إذن من حيث النتيجة . وبجمع السهمين الناجمين عن هذين «الأسلوبين الآخرين» مع السهم النهائي المحسوب في الشكل (٥٩) نحصل على تقريب أحسن من ذي قبل في معرفة السهم النهائي المقصود .

ولكن انتظروا قليلاً : إن كلاً من النقطتين 5 و6 يمكن أن توجد في أي موضع من المكان ومن الزمان ـ نعم ، حقاً في أي موضع ـ وعلينا إذن أن نحسب الأسهم المتعلقة بكل نقاط الزمكان وأن نجمعها . وبذلك ترون أن الأمور بدأت تقتضي عملاً ضخماً.

وليس السبب أن القواعد (النهوج) مقعدة ـ الحال هنا تشابه لعبة الشطرنج : القواعد بسيطة لكن عدد مرات تطبيقها كبير . فصعوبة حساباتنا سببها العدد الكبير للأسهم التي علينا التعامل معها ضرباً وجمعاً . ذلك هو السبب في قضاء الطلاب أربع سنوات ، بعد الشهادة الجامعية الأولى ، ليتعلموا إجراء هذه الحسابات دون أغلاط ، علماً أننا هنا حيال مسألة سهلة ، تصوروا أنها ليست سوى أول الغيث! (عندما تصبح المسائل أصعب بكثير نستعين على حلها بالحاسوب!) .

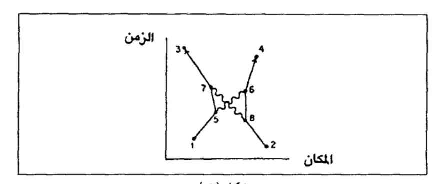
أُحب أن ألفت نظركم إلى شيء بخصوص الفوتونات الصادرة والممتصة . إذا كانت النقطة 6 لاحقة للنقطة 5 ، أمكن أن نقول إن الفوتون قد صدر في 5 وامتُصَّ في 6 (شكل ٦١) . وعندما تكون 6 سابقة لـ 5 يمكن أن نفضِّل القول بأن الفوتون صدر في 6 وامتُصَّ في 5 ، ولكن نستطيع سواءً بسواء ، أن نقول إن الفوتون صعد سلَّم الزمن نحو الماضي! والواقع أننا في غنى عن الاهتمام بجهة حركة الفوتون في الزمكان ، فكل شيء محسوب حسابه في صيغة P (5 إلى 6) ، ونكتفي بالقول إن فوتوناً قد حدث «تبادله» . إن الطبيعة ذات بساطة رائعة(*)!.

(*) إن هذا الفوتون المتبادل ، الذي لا يظهر في الظروف البدئية ولا في الظروف النهائية للتجربة ، يُدعى أحياناً «فوتونا وهمياً virtual».



شكل (٦١)

لما كان الضوء ذا سعة للذهاب بأسرع أو بأبطأ من سرعته المعهودة، نستطيع أن نتخيل أن الفوتونات، في الأمثلة الثلاثة أعلاه، تصدر في النقطة 5 وتُمتص في 6 ،حتى ولو كان إصدار الفوتون وامتصاصه، في المثال (b)، يحدثان في لحظة واحدة، وكان الفوتون في المثال (c) قد امتُص قبل أن يصدر ـ وهو موقف قد تُفضِّلون التعبير عنه بالقول بأن الفوتون قد صدر في 6 وامتُص في 5 وذلك كي توفِّروا عليه أن يصعد سلَّم الزمن (نحو الماضي)! أما فيما يخص الحساب (والطبيعة) فهذا القول لا يختلف عن ذاك (وهما ممكنان سواءً بسواء)؛ وعلى هذ نكتفي بالقول بأن الفوتون قد «تبودل» وأن نُدخل في وصفة حساب P (A إلى B) قيم المواقع في الزمكان.



شكل (٦٢)

إن الحادث الموصوف في الشكل (٥٩) يمكن أيضاً أن يقع بأساليب تنطوي على تبادل فوتونين. وبهذا الصدد يوجد عدة مخططات متاحة (كما سنرى بتفصيل أكثر فيما بعد) نرسم أحدها هنا. والسهم الناجم عن هذا الأسلوب ينطوي على جميع النقاط المرحلية 5 ,6 ,7 ,8، المتاحة، ويُصبح حسابه صعباً جداً. ولكن لما كان j أصغر من 0.1 فإن طول هذا السهم يكون عموماً أصغر من جزء من عشرة آلاف جزء (بسبب وجود أربعة اقترانات) من السهمين الناجمين عن الأسلوبين الواردين في الشكل (٥٩)، اللذين لا يحويان أي j.

والآن، وإضافة إلى الفوتون المتبادل بين 5 و6، يمكن أن نفكر بتبادل فوتون آخر ـ بين نقطتين أخريين، 7و8 (شكل ٦٢). والحق أنني مللت من كتابة كل المراحل الأساسية التي يجب ضرب أسهمها، لكن كل خط مستقيم (كما لا بد أن لاحظتم) يعطي سعة E (A إلى B) وكل خط متموج يعطي P (A إلى B) وكل اقتران يعطي j، وذلك من أجل كل النقاط، 5 ,6 ,7 ,8 الممكنة! وهذا يعطينا آلافاً مؤلفة من الأسهم التي نعالجها ضرباً وجمعاً.

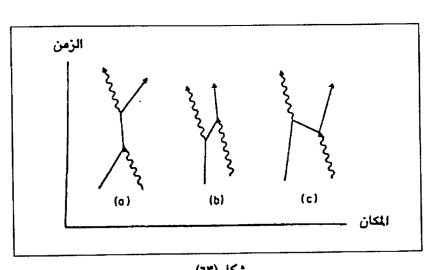
يبدو أن حظنا معدوم في التوصل إلى حساب سعة هذا الحادث البسيط جداً، لكنكم لو كنتم طلاباً وتريدون النجاح في الامتحان لفعلتم ذلك رغماً عنكم.

بيد أن هناك بارقة أمل، ونكتشفها في ذلك العدد السحري، j. إن الأسلوبين المباشرين، في مثالنا البسيط هذا، لا يستدعيان دخول j، وفي الأسلوب الثالث كان يوجد j × j، وفي آخر أسلوب ذكرناه يوجد j × j × j × j. ولما كان j × j أصغر من 0.01 فإن طول السهم المقابل أصغر عموماً من 1% من طول السهم المقابل لأسلوب مباشر، والسهم الخاضع لتقصير نسبته j × j × j × j يصبح أقصر بعشرة آلاف مرة من طول السهم الذي لا يُضرب بـ j. ولو خُصص لكم وقت كاف لاستخدام الحاسوب (الكمبيوتر) في حساب الإمكانيات الحاوية j^6 (واحد من مليون) لنافستم في الدقة أدق التجارب. هذه هي طريقة حساب الحوادث البسيطة. هكذا يُعمل، وهذا كل ما في الأمر!.

لندرس الآن حادثاً آخر. نبدأ بفوتون وإلكترون وننتهي بفوتون وإلكترون. إن أحد الأساليب في وقوع هذا الحادث هو التالي: فوتون يمتصه إلكترون، الإلكترون يتابع سيره قليلاً ثم يصدر منه فوتون آخر. يدعى هذا الحادث انتشار scattering الفوتون (أو تبعثره). عندما نرسم بيانات الانتشار، ونجري حساباتها، يجب إدخال بعض الإمكانيات الخاصة (شكل ٦٣). ربما يصدر الإلكترون فوتوناً قبل أن يمتص فوتوناً (الرسم b). والإمكانية (c) أكثر غرابة: يُصدر الإلكترون فوتوناً، ثم يرجع أدراجه في الزمن كي يمتص فوتوناً، وينطلق من جديد باتجاه الزمن. إن طريق مثل هذا الإلكترون، الذي «يتراجع زمنياً» يمكن أن يكون طويلاً بما يكفي لظهوره في أثناء تجربة فيزيائية واقعية في المختبر. إن سلوكه مأخوذ في حسبان البيانات وفي المعادلة التي تعطي E (A إلى B).

عندما نرصد أحد هذه الإلكترونات المنكفئة (التي تسلك في الزمن اتجاهاً يعاكس اتجاهنا فيه) نلاحظ أن له مظهر الإلكترونات العادية نفسه - يقال إن له «شحنة موجبة». لو كُنت أدخلت مفعولات الاستقطاب لرأيتم لماذا تبدو إشارة شحنة هذا الإلكترون معكوسة، مما يجعلها تبدو موجبة) ويُسمى «بوزترون positron». فالبوزترون جسيم نديد للإلكترون، إنه نموذج لـ «الجسيم المضاد antiparticle»(*).

(*) اقترح ديراك Dirac فكرة وجود «الكترونات مضادة» عام ١٩٣١، وقد تم اكتشافها تجريبياً في العام التالي لدى أندرسون C. Anderson الذي أسماها بوزترونات. واليوم تنتج البوزترونات (من تصادم فوتونين مثلاً) وتُحفظ لمدة أسابيع في حقل مغنطيسي.



شكل (٦٣)

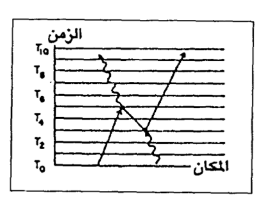
إن انتشار الضوء يتناول فوتوناً يلتقي إلكتروناً وفوتوناً ناجماً عن هذا اللقاء ـ ولكن ليس بهذا الترتيب لزاماً ، كما نرى في المثال (b) . المخطط (c) يمثل إمكانية عجيبة لكنها حقيقية : يُصدر الإلكترون فوتوناً ، ثم يذهب نحو الماضي حيث يمتص فوتوناً ويذهب بعده نحو المستقبل .

وهذه ظاهرة عامة . فلكل جسيم في الطبيعة سعة تتعلق بحركة متراجعة في الزمن ، وله بالتالي جسيم مضاد . وعندما يلتقي جسيم جسيمه المضاد فإنهما يتفانيان معاً وتتشكل جسيمات أخرى (عموماً فوتون أو اثنان في حال تفاني إلكترون وبوزترون) . وماذا بشأن الفوتونات؟ لقد ذكرنا أن الفوتون لا يتغير من ميزاته أي شيء عندما يتراجع نحو الماضي ؛ فهو إذن جسيم نفسه المضاد . وهكذا ترون أي نوع من الحيل نلجأ إليه لإدخال الشذوذ في القاعدة! .

أريد أن أشرح لكم ماذا نرى في الإلكترون الذي يرجع القهقرى في الزمن ، نحن الذين نتطور في اتجاهه . ولأجل ذلك أقسم مستوى البيان الزمكاني إلى شرائح رقيقة بين T_0 و T_{10} (شكل ٦٤) ، بخطوط موازية لمحور المكان . أنطلق من T_0 مع إلكترون يتحرك باتجاه فوتون يتحرك ، هو الآخر ، للقائه . وفجأة ، في T_3 ، يتحول الفوتون إلى جسيمين ، بوزترون وإلكترون جديد . البوزترون لا يدوم طويلاً ، بل يصدم الإلكترون القديم ، في T_5 ، ويتفانى معه مولِّدين فوتوناً جديداً . وفي أثناء ذلك يتابع ذلك الإلكترون الجديد طريقه في الزمكان .

والآن أحب أن أتحدث إليكم عن الإلكترون في الذرة . ولفهم سلوك الإلكترونات في الذرات يجب أن أضيف لاعباً آخر هو النواة ـ الجسيم الثقيل في مركز الذرة والذي ينطوي على بروتون واحد على الأقل (إن البروتون «علبة

بندورا»(*) سنفتحها في المحاضرة القادمة) . ولن أعطيكم اليوم القوانين الصحيحة لسلوك النواة ، فهي معقدة جداً . أما في الحال التي تهمنا ، حيث تظل النواة هادئة غير مُثارة ، يمكن ، بعملية تقريبية ، أن نشبِّه سلوك النواة بسلوك جسيم له سعة في الذهاب من نقطة لأخرى في الزمكان ، سعة معطاة بالصيغة E (A إلى B) ، لكن للعدد n فيها قيمة أكبر بكثير . ولما كانت النواة ثقيلة جداً بالنسبة للإلكترون نستطيع أن نعاملها ، تقريباً ، على افتراض أنها ساكنة عملياً ، في مكان واحد ، غير أنها متحركة بالنسبة للزمن .



شكل (٦٤)

لندرس المثال الوارد في الشكل (٦٣) باسم (c) ذاهبين بالاتجاه العادي لجريان الزمن (لأننا مجبرون على فعل ذلك في المختبر) . من T_0 إلى T_3 نرى الإلكترون والفوتون ذاهبين للتلاقي . وفجأة في T_3 «يتفكك» الفوتون ، وينشأ جسيمان - إلكترون وجسيم جديد اسمه «البوزترون» وهو إلكترون يصعد نحو الماضي ويبدو متجهاً نحو الإلكترون الأصلي نفسه! يتفانى البوزترون مع الإلكترون الأصلي ، في T_5 ، وينشأ عن تفانيهما فوتون جديد . وفي أثناء ذلك يتابع الإلكترون ، الذي انبثق من تفكك الفوتون الأصلي ، طريقه نحو المستقبل في الزمكان . . إن سلسلة الحوادث هذه يمكن رصدها في المختبر ، وهي مأخوذة آلياً بالحسبان في E (A إلى B) دون أي تعديل .

تتألف أبسط الذرات ، واسمها الهدروجين ، من بروتون وإلكترون . والإلكترون مجبر ، بفعل تبادل فوتونات مع البروتون ، على البقاء في جواره وهو يرتعش (شكل ٦٥)(**) .

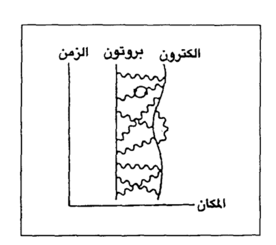
أود الآن أن أريكم بيان إلكترون في ذرة هدروجين تنثر الضوء شكل (٦٦) . ففي أثناء تبادل فوتونات بين الإلكترونات والنواة ، يصل فوتون من خارج النواة ، فيصدم الإلكترون فيمتصه ، وبعد قليل يصدر فوتون جديد . (ويوجد ، كالعادة ، إمكانيات

(*) في أساطير الإغريق ، امرأة حكيمة من صنع الآلهة . أهداها كبيرهم ، زفس Zeus ، علبة ربانية حظر عليها فتحها ، ففتحها زوجها خلسة فانطلقت منها كل أصناف الخير والشر ولم يبق في قعرها غير الأمل . (المترجم) .

(**) إن السعة في تبادل الفوتون تساوي (-j) x P (A إلى B) x j ، أي جداء اقترانين بسعة ذهاب الفوتون من موضع لآخر . والسعة المتعلقة باقتران بروتون بفوتون هي (-j).

أخرى، كأن يصدر الفوتون الجديد قبل امتصاص القادم) . هذا وإن الذرات التي تحوي عدة بروتونات وما يقابلها من إلكترونات، تنثر الضوء أيضاً (إن ذرات الهواء تنثر ضوء الشمس، وهذا هو السبب في زُرقة السماء)، لكننا لو رغبنا في رسم البيانات من أجل هذه الذرات لاضطررنا إلى رسم خطوط، مستقيمة ومتموجة، عددها يولِّد القنوط! لكن السعة الكلية، لكل الأساليب التي يمكن أن يسلكها الإلكترون في نثر الضوء، تُختصر في سهم واحد، أي بنسبة تصغير معينة وتدوير معين . (سنرمز، فيما بعد، لهذا السهم بـ «S») . وهذا المقدار يتعلق بالنواة وبتوزع الإلكترونات حولها؛ فيتغير إذن بحسب المواد .

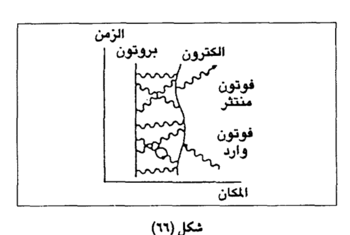
لنعد الآن إلى الانعكاس الجزئي للضوء بصفيحة من الزجاج . كيف يحدث ذلك؟ لقد تكلمت عن انعكاس الضوء عن وجهي الصفيحة، الأمامي والخلفي؛ لكن ذلك كان لتبسيط الأمور وجعلها أسهل في البدء . لكن الواقع أن الضوء لا يتأثر بتاتاً بالسطوح . لأن الفوتون الوارد تنثره إلكترونات ذرات الزجاج، والذي يصل إلى الكاشف هو فوتون جديد . ومن المدهش مع ذلك أننا، بدلاً من جمع آلاف مؤلفة من الأسهم القزمة التي تسهم في سعة انتشار فوتون وارد بواحد من إلكترونات الزجاج، نستطيع الاكتفاء بجمع سهمين فقط ـ واحد للانعكاس عن «الوجه الأمامي»، وآخر للانعكاس عن «الوجه الخلفي» ـ للحصول على الجواب نفسه . لنبحث عن السبب .



شكل (٦٥)

إلكترون واقف على مسافة معينة من نواة الذرة بفضل تبادل فوتونات بينه وبين بروتون (حلبة بندورا، سنفتحها في الحاضرة الرابعة) . يمكن، في الوقت الحاضر، أن نمثل البروتون بجسيم شبه ساكن . هذا البيان يمثل ذرة هدروجين مؤلفة من بروتون واحد والكترون يتبادل فوتونات معه .

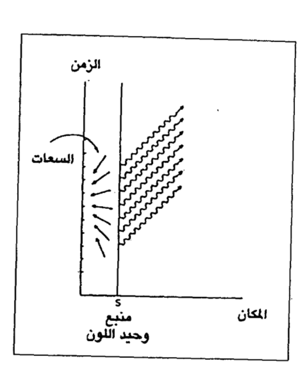
لمناقشة الانعكاس بصفيحة زجاجية، في وجهة نظرنا الجديدة، يجب أن نأخذ في الحسبان البعد الزمني. فقد كنا قبل الآن، لدى الكلام عن ضوء منبع وحيد اللون، نلجأ إلى استخدام مزمان تخيلي لقياس الزمن اللازم للفوتون كي يقطع مسافة ما ـ كان عقرب المزمان يعيِّن زاوية (اتجاه) السهم المتعلق بتلك المسافة، لكن الصيغة من أجل P (A إلى B) (السعة كي يذهب الفوتون من نقطة لأخرى) لا تحوي أية إشارة إلى أي تدوير. فماذا حدث للمزمان؟ ماذا بشأن التدوير؟.



شكل (٦٦)

إن ظاهرة إنتشار الضوء عن إلكترون في ذرة، تفسر الانعكاس الجزئي بصفيحة من الزجاج. وهذا البيان يمثل أحد الأساليب المتاحة لوقوع هذا الحادث في ذرة هدروجين.

كنت في محاضرتي السابقة قد اكتفيت بالقول إن الضوء المستعمل وحيد اللون. ولإجراء تحليل صحيح للانعكاس الجزئي بصفيحة الزجاج لا بد من أن نعرف أشياء أكثر عن المنابع الضوئية وحيدة اللون. إن سعة صدور فوتون من منبعه تتعلق عموماً بالزمن: إن زاوية سعة إصدار الفوتون من المنبع تتغير بمرور الزمن. فمنبع الضوء الأبيض ـ مزيج عدة ألوان ـ يصدر فوتوناته بوتيرة فوضوية: أي أن زاوية السعة تتغير، مفاجئة وغير منتظمة، من إصدار لآخر. فلصنع منبع وحيد اللون تُبنى منظومة مدبّرة بعناية كي تكون سعة إصدار الفوتون، في لحظة معينة، سهلة الحساب: أي أن تصدر الفوتونات بوتيرة ثابتة، على زاوية تتغير بسرعة ثابتة تماماً كما هو الحال بالنسبة لتغير زاوية عقرب المزمان. (الواقع أن هذا السهم يدور بسرعة دوران عقرب المزمان التخيلي الذي استعملناه من قبل، ولكن بالاتجاه المعاكس، شكل (٦٧).

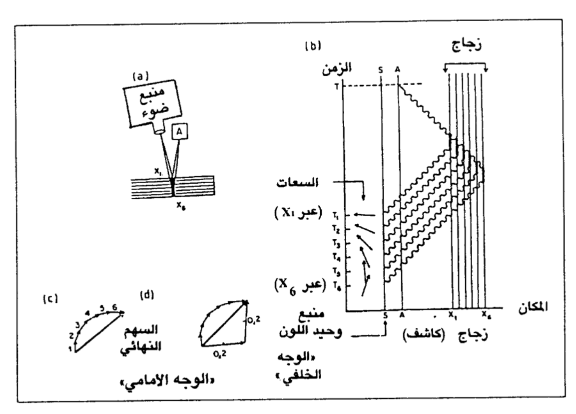


شكل (٦٧)
إن المنبع وحيد اللون جهاز رائع صمم لاصدار فوتون باسلوب مدروس جيدا : سعة اصدار الفوتون في لحظة معينة تدور ، بدلالة هذه اللحظة ، بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة. فزاوية سعة اصدار الفوتون في لحظة لاحقة تكون إذن أصغر . سنفترض أن كل الضوء الصادر عن المنبع يسير بالسرعة c (فرضية المسافات الكبيرة) .

إن سرعة دوران السهم تتعلق بلون الضوء : فسهم المنبع الأزرق ، كما كان يفعل عقرب المزمان ، يدور بأسرع مرتين تقريباً من دوران سهم الأحمر . والميقاتية التي نستخدمها ، بمنزلة «مزمان تخيلي» ، هي إذن المنبع وحيد اللون نفسه ، والحقيقة أن زاوية السعة المتعلقة بمسافة معينة لا تتعلق إلا بلحظة صدور الفوتون عن المنبع .

وبمجرد أن يصدر الفوتون ، وفي أثناء سيره كله من نقطة لأخرى في الزمكان ، لا يستمر السهم بالدوران . ورغم أنه يوجد ، بموجب صيغة P (A إلى B) ، سعة لذهاب الضوء من نقطة لأخرى بسرعات مختلفة عن c ، فإن المسافة بين المنبع والكاشف في تجربتنا كبيرة نسبياً (إذا قيست بحجم الذرة) ، والإسهام الوحيد المحسوس في طول P (A إلى B) يأتي من السرعة c.

ولمباشرة حسابنا الجديد للانعكاس الجزئي ، لنبدأ بتحديد الحادث بتمامه: الكاشف في A «يتك» في لحظة ما ، T . لنقسّم الآن صفيحة الزجاج إلى طبقات رقيقة جداً ـ لنقل ستاً (شكل (٦٨)a) . إن التحليل الذي أجريناه في المحاضرة الثانية أتاح لنا أن نرى أن المنطقة المركزية من المرآة هي التي تعكس أكبر قسط من الضوء ؛ فنحن نعلم إذن ، حتى ولو أن كل الكترون ينشر الضوء في كل الاتجاهات ، أن عملية جمع كل أسهم الطبقة الواحدة تدل على أن المنطقة الوحيدة التي لا تنعدم فيها الأسهم ، بالتعديل بعضاً ببعض ، تتعلق بضوء يذهب مباشرة نحو منتصف الطبقة ثم ينتشر في أحد اتجاهين اثنين : إما أن يصعد نحو الكاشف أو أن يستمر في طريقه عبر الزجاج .



شكل (٦٨)

في هذا التحليل الجديد للانعكاس الجزئي نبدأ بتقسيم صفيحة زجاجية إلى عدد من الطبقات (ست في المثال الراهن)، ثم نتفحص مختلف الأساليب المتاحة للضوء كي يذهب من المنبع إلى الزجاج ويصل إلى الكاشف. فالأمكنة المهمة في الزجاج (أي حيث لا تنعدم سعات انتشار الضوء) تقع في أوسط كل طبقة، والنقاط المتعلقة بها من X_1 إلى X_6، مثلناها في (a) في صفيحة الزجاج، وفي (b) بالخطوط الشاقولية في البيان الزمكاني. إن الحادث الذي نحسب احتماله هو أن «يتك» الكاشف A في لحظة معينة T. فهذا الحادث إذن يتمثل بنقطة (تقاطع المستقيمين T، A) على البيان الزمكاني.

إن كل واحد من الأساليب المتاحة لوقوع الحادث يتطلب أربعة مراحل متوالية يتعلق بها إذن أربعة أسهم نضربها معاً. هذه المراحل ممثلة في الشكل (b): ١) فوتون يغادر المنبع في لحظات معينة (الأسهم في اللحظات T_1 إلى T_6 تمثل سعات الإصدار في هذه اللحظات)؛ ٢) الفوتون يذهب من المنبع إلى نقطة في الزجاج (الأساليب الستة المتاحة ممثلة بالخطوط المتموجة الصاعدة نحو اليمين)؛ ٣) إلكترون في هذه النقطة ينثر الفوتون (مرحلة تتمثل بخط قصير شاقولي)؛ ٤) فوتون جديد ينطلق نحو الكاشف حيث يصل في اللحظة المحددة T (مرحلة تتمثل بخط متموج صاعد نحو اليسار). إن للمراحل 2، 3، 4 سعات واحدة من أجل الأساليب الستة المتاحة، في حين أن السعات المتعلقة بالمرحلة 1 متخالفة. وبالنسبة لفوتون ينتشر بالإلكترون عند سطح الزجاج (في X_1) يجب على الفوتون المنتشر في مكان أعمق في الزجاج - في X_2 مثلاً - أن يكون قد غادر المنبع في لحظة أبكر T_2.

ومن أجل كل أسلوب يجب ضرب الأسهم الأربعة الناجمة عن المراحل الأربع؛ إن الأسهم المتعلقة بكل أسلوب والمرئية في (c) تكون أقصر من الأسهم البدئية المرسومة في (b)؛ وكل سهم قد دُوِّر بـ 90° (بسبب خاصة الإنتشار بالإلكترونات في الزجاج). وعندما نجمع الأسهم الستة بالترتيب نرى أنها تشكل قوساً دائرية وترها السهم النهائي. ونستطيع الحصول على السهم النهائي نفسه برسم سهمين نصف قطريين، كما في (d)، و «نطرحهما» (أي نُدوِّر السهم المتعلق بـ «الوجه الأمامي» نصف دورة ثم نضيفه إلى السهم المتعلق بـ «الوجه الخلفي»). تلك هي الطريقة «المختزلة» التي اتبعناها في المحاضرة الأولى لتبسيط العرض.

وهكذا إذن نجد السهم الحاصل المتعلق بالحادث من جمع الأسهم الستة التي تمثل انتشار الضوء عن النقاط الست منتصفات الطبقات المتوالية ـ X_1 إلى X_6 ـ والواقعة بعضاً فوق بعض (في صفيحة أفقية) .

حسناً ،لنحسب الأسهم المتعلقة بكل أسلوب يتبعه الضوء ـ ماراً بكل من النقاط الست ، X_1 إلى X_6 . إن في كل أسلوب أربع مراحل (مما يعني وجود أربعة أسهم يجب ضربها) :

ـ المرحلة رقم 1 : فوتون يصدره المنبع في لحظة معينة .

ـ المرحلة رقم 2 : الفوتون يذهب من المنبع إلى نقطة في الزجاج .

ـ المرحلة رقم 3 : الفوتون ينتثر بإلكترون في تلك النقطة .

ـ المرحلة رقم 4 : فوتون جديد يصعد نحو الكاشف .

واضح أن السعتين المتعلقتين بالمرحلتين 2 و4 (فوتون يذهب إلى نقطة ، أو يأتي من نقطة) لا ينطويان على تصغير ولا على تدوير ، لأننا نستطيع افتراض أنه لا يوجد أي ضوء مشتت أو ضائع بين المنبع والزجاج أو بين الزجاج والكاشف . أما فيما يخص المرحلة 3 (إلكترون ينثر فوتوناً) فإن سعة الانتثار ثابتة (تصغير وتدوير لكمية ما ، S) أي لا تتغير بين نقطة وأخرى من الزجاج . (لقد ذكرتُ آنفاً أن هذه الكمية تتغير من مادة لأخرى . إن التدوير من أجل الزجاج يساوي 90°) . لدينا إذن أربعة أسهم علينا ضربها معاً ، والمرحلة 1 وحدها (سعة إصدار المنبع للفوتون في لحظة معينة) تختلف إذن من أسلوب لآخر .

إن اللحظة التي يجب أن يصدر الفوتون فيها كي يبلغ الكاشف A في اللحظة T (شكل (٦٨) b) تختلف باختلاف الطريق المسلوك . فالفوتون الذي انتثر عند X_2 يجب أن يكون قد صدر أبكر قليلاً من فوتون انتشر عند X_1 ، لأن طريقة أطول . وعلى هذا يكون سهم الإصدار في اللحظة T_2 ذا زاوية مع سهم الإصدار في اللحظة T_1 ، لأن سعة إصدار منبع وحيد اللون في لحظة معينة تدور في اتجاه معاكس لاتجاه دوران عقرب ميقاتية بمرور الزمن . وهكذا الحال من أجل كل سهم حتى نبلغ T_6: فللأسهم الستة طول واحد ،لكن اتجاهاتها مختلفة لأنها تمثل فوتونات صدرت في لحظات مختلفة .

بعد تصغير السهم المتعلق بالإصدار في اللحظة T_1 بالنسب التي تقتضيها

المراحل 2 و3 و4 وتدويره بزاوية 90° تقتضيها المرحلة 3 ، نحصل على السهم 1 (شكل (٦٨) c) . نكرر العملية من أجل الحصول على الأسهم 2،....،6. إن لها كلها طولاً واحداً (مصغَّرة) ، وتتوالى اتجاهاتها ، واحداً بعد آخر ، كما تتوالى اتجاهات أسهم الإصدار من T_1 إلى T_6.

لنجمع الآن الأسهم من 1 إلى 6 .فبوضعها واحداً بعد الآخر بهذا الترتيب نحصل على شيء يشبه القوس ، أو قسماً من دائرة . فالسهم الحصيلة هو وتر هذه القوس ، طوله يزداد بازدياد ثخن الصفيحة - الثخن الأكبر يعني طبقات أكثر ، وبالتالي أسهما أكثر وقوساً دائرية أكبر - إلى أن نحصل على نصف دائرة (عندئذ يكون السهم قطرها) . بعدئذ يتناقص السهم الحاصل بتزايد ثخن الزجاج إلى أن نحصل على دائرة كاملة تبدأ بعدها دورة ثانية . إن احتمال الحادث ، كما نعلم ، يساوي مربع طول السهم الحاصل ، وهذا يتغير بين الصفر و16% في أثناء كل دورة .

هذا وفي الرياضيات حيلة تتيح الحصول على النتيجة نفسها (شكل ٦٨ d): إذا رسمنا سهمين يذهب أولهما من مركز «الدائرة» إلى ذيل السهم 1 ، ويذهب الآخر من هذا المركز إلى رأس السهم 6 ، نحصل على نصفي قطر . وبجمع معكوس السهم الأول (بغية «طرحه») مع السهم الثاني نحصل على السهم النهائي نفسه! وهذا ما فعلته في المحاضرة الأولى : ذلك أن نصفي القطر هذين هما السهمان اللذان يمثلان الانعكاسين بوجهي الصفيحة ، الأمامي والخلفي . ولكل منهما الطول المعهود 0,2(*).

نستطيع إذن الحصول على النتيجة الصحيحة ، في حساب الانعكاس الجزئي ، بأن نتصور (خطأ) أن الانعكاس لا يأتي فقط من الوجهين ، الأمامي والخلفي . وفي إطار هذا النموذج البسيط والمعقول يتبين أن السهمين المتعلقين بـ «الوجه الأمامي» و«الوجه الخلفي» ليسا سوى صنيعتين رياضيتين تقودان إلى النتيجة الصحيحة ، في حين أن التحليل الذي قدمناه - باستخدام البيان الزمكاني والأسهم التي تتخذ بالجمع شكل قوس دائرية - يؤلف تمثيلاً للحقيقة أكثر وفاء . إن الانعكاس الجزئي ليس ، في نهاية الأمر ، سوى انتشار الضوء بالإلكترونات ضمن الزجاج .

(*) إن نصف قطر القوس يتعلق طبعاً بطول السهم المتعلق بكل طبقة ، وهو الآخر يتعين بالسعة S كي ينثر إلكترون في ذرة من الزجاج فوتوناً . ونستطيع حساب نصف القطر ذاك بتطبيق قواعد حساب النهوج الثلاثة الأساسية على حشد التبادلات الفوتونية المتاحة ، ومن ثم بجمع السعات . وهذه مسألة صعبة ، لكن نصف القطر ذاك قد حُسب بنجاح من أجل بضع مواد بسيطة نسبياً ، ونحن نفهم الآن بشكل معقول ، بفضل الالكتروديناميك الكمومي ، تغير نصف القطر من مادة لأخرى . ويجب مع ذلك أن أذكر أن ما من أحد أجرى حتى الآن الحساب من أوله لآخره انطلاقاً من المبادىء الأساسية ومن أجل مادة معقدة كالزجاج . وفي هذه الأحوال يجب تعيين نصف القطر تجريبياً . وقد وُجد أنه يساوي 0,2 تقريباً من أجل الزجاج (عندما يكون ورود الضوء عمودياً على سطح الزجاج) .

والآن ، ماذا بخصوص الضوء الذي يمر مخترقاً صفيحة الزجاج؟ هناك أولاً سعة كي يخترق الفوتون الزجاج دون أن يلقى أي إلكترون (شكل (٦٩) a) . إنها أكبر الأسهم طولاً . لكن الفوتون يمكن أن يبلغ الكاشف B تحت الزجاج بستة أساليب أخرى : أن يرتطم بـ X_1 أولاً ثم ينتشر حتى B ، أن يرتطم بـ X_2 أولاً ثم ينتشر حتى B ، الخ . وطول كل من هذه الأسهم يساوي طول كل من الأسهم التي كانت تشكل القوس الدائرية في المثال السابق : فهذا الطول يتعين ، في كل الأحوال ، بالسعة S نفسها كي ينتشر فوتون بالكترون في الزجاج . لكن الأسهم الستة هنا تتجه كلها باتجاه واحد ، لأن أطوال كل الطرق المنطوية على انتشار واحد متساوية . ومن أجل المواد الشفافة كالزجاج تصنع هذه الأسهم زاوية قائمة مع السهم الرئيسي (الخالي من الانتثار) . وعندما نجمع هذا الأسهم الصغيرة مع السهم الرئيسي نحصل على سهم له عملياً طول السهم الرئيسي لكنه يتجه باتجاه مختلف قليلاً . وهكذا أيضاً تعمل العدسة : تتدبر الأمر بها كي تتجه الأسهم المتعلقة بكل طريق من الطرق باتجاه واحد ، وذلك بادخال ثخانات إضافية من الزجاج في الطرق الأقصر .

ويمكن الحصول على مفعول مماثل تماماً إذا كانت الفوتونات أبطأ سيراً في الزجاج منها في الهواء : كان يوجد زاوية تدوير إضافية في السهم الحاصل . ولهذا السبب قلتُ سابقاً إن الضوء يبدو أبطأ في الزجاج (أو الماء) منه في الهواء . وهذا «التباطؤ» ليس إلا التدوير الإضافي الذي تسببه ذرات الزجاج (أو الماء) التي تنثر الضوء . ويُطلق اسم «قرينه (أو معامل) الانكسار» على هذا التدوير الاضافي للسهم الحاصل في حال اختراق الضوء للمادة المدروسة(*).

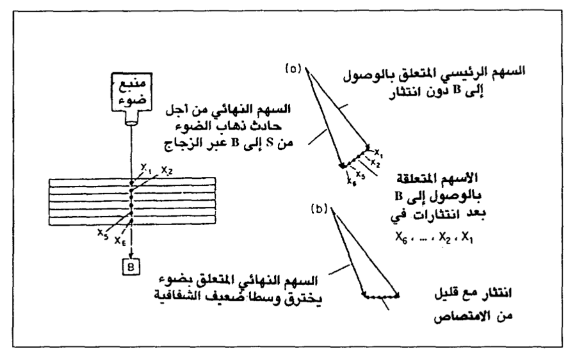
إن الأسهم الصغيرة ، من أجل المواد التي تمتص الضوء (ضعيفة الشفوف) ، تصنع مع السهم الرئيسي زاوية أصغر من 90 ° (شكل b) . عندئذ يصبح السهم الحاصل أقصر من السهم الرئيسي ، مما يعني أن احتمال نفاذ الفوتون عبر زجاج ضعيف الشفوف أصغر منه عبر زجاج شفاف .

هكذا ترون أن كل الظواهر والأعداد الاعتباطية التي ذكرتها في المحاضرتين السابقتين ـ كالانعكاس الجزئي بسعة تساوي 0.2 ، و«تباطؤ» الضوء في الهواء

(*) إن الأسهم المتعلقة بالانعكاس عند الطبقات (والتي تتجمع على شكل «دائري») ذات طول يساوي طول كل من الأسهم التي تُسهم في التدوير الإضافي للسهم الحاصل في حال الاختراق . يوجد إذن علاقة بين الانعكاس الجزئي عند سطح المادة وبين قرينة انكسارها . وهنا يبدو أن طول السهم الحاصل أكبر من الواحد ، مما يجعل كمية الضوء النافذ من الزجاج أكبر مما دخل فيه! وهذا ناجم عن أنني أهملت سعة أن يصل الفوتون إلى طبقة تنثر فوتوناً آخر إلى طبقة أخرى تنثر بدورها فوتوناً ثالثاً نحو الكاشف ـ وإمكانيات أخرى أعقد ـ مما يجعل الأسهم الصغيرة تنعطف بالتوالي بما يحتفظ للسهم الحاصل بطول يتراوح بين 0,92 و 1 (بحيث أن الاحتمال الكلي لانعكاس الضوء أو نفاذه عبر صفيحة الزجاج يظل مساوياً 100%).

والزجاج ، الخ ـ تتفسر بتفصيل أكثر إذا اعتمدنا ببساطة على النهوج الثلاثة الأساسية ـ نهوج ثلاثة تفسر في الواقع كل شيء آخر تقريباً.

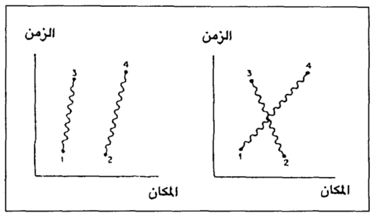
إن من الصعب على المرء أن يُصدق أن هذا التنوع الكبير في الطبيعة يكاد ينجم حصراً عن انضمام نسخ متوالية من ثلاثة نهوج أساسية فقط. لكن ذلك، على غرابته، صحيح! وسأريكم الآن، قدر المستطاع، من أين يأتي هذا التنوع.



شكل(٦٩)

إن العملية الحالية من الانتشار بالكترونات الزجاج، المتمثلة في (a)، هي التي تسهم بأكبر قسط في سعة اختراق الضوء لصفيحة الزجاج حتى يصل إلى الكاشف B. نضيف إلى هذا السهم ستة أسهم صغيرة ناجمة عن انتشار الضوء بالطبقات الست الممثلة بالنقاط X_1 إلى X_6. ولهذه الأسهم الستة طول واحد (لأن سعة الانتشار لا تختلف من نقطة لأخرى من الزجاج) وتتجه باتجاه واحد (لأن الطرق كلها، الذاهبة من المنبع إلى الكاشف مروراً بالنقاط X، لها طول واحد). وبعد جمع هذه الأسهم الستة الصغيرة مع السهم الكبير نجد أن السهم النهائي، المتعلق باختراق الضوء لصفيحة الزجاج، يصنع زاوية مع السهم الرئيسي المتعلق بالاختراق المباشر (دون انتشار). ولهذا السبب يبدو لنا أن الضوء يسير في الزجاج بأبطأ من سيره في الهواء. وهذه الزاوية، التي يصنعها السهم النهائي مع سهم الاختراق المباشر، تسمى «قرينة انكسار» الزجاج.
إن الأسهم الصغيرة، في حال المواد الشفافة، تكون عمودية على السهم الرئيسي (الواقع أنها تنحني عندما نأخذ بالحسبان الانتشارات المتاحة بأكثر من الكترون واحد في كل طبقة، مما يحول دون أن يكون السهم النهائي أطول من السهم الرئيسي: إن الطبيعة تتدبر دوماً أمرها كي لا يكون الضوء الخارج من الصفيحة أغزر مما دخل فيها). وفي حال كون المادة رديئة الشفافية ـ تمتص قسطاً من الضوء ـ تصبح الأسهم الصغيرة مائلة نحو السهم الرئيسي، ويصبح السهم أقصر قليلاً من المتوقع، وهذا السهم النهائي الأقصر يمثل احتمالاً، أصغر، كي يخترق الفوتون مادة كتيمة جزئياً أمام الضوء.

لنبـدأ بالفـوتونـات (شكل ٧٠) . ما هو احتمال أن يصل فوتونان ، موجودان في النقطتين 1 و 2 من الزمكان ، إلى الكاشفين الموجـودين في 3 و 4؟ يمكن لهذا الحادث أن يقع بأسلوبين رئيسيين ، كل منهما يتعلق بوقـوع شيئين معاً : يمكـن للفـوتونين أن يذهبا مباشرة ـ P (1 إلى 3) × P (2 إلى 4) ـ أو أن يتقاطع طريقاهما ـ P (1 إلى 4) × P (2 × 3) . عندئذ نجمع السعتين الحصيلتين ، ويحدث تداخل (كما رأينا في المحاضرة الثانية) ، مما يجعل طـول السهـم النهائي متغيراً بتغير توزع النقاط الأربع في الزمكان .



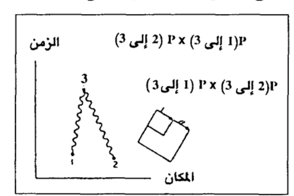
شكل (٧٠)

نستطيع ، بعملية تقريبية ، أن نقدر سعة أن يذهب فوتونان ، موجودان في النقطتين 1 و 2 إلى النقطتين 3 و 4 من الزمكان ، وذلك بحساب سعتي الأسلوبين الرئيسيين المتاحين لوقوع هذا الحادث : P (1 إلى 3) × P (2 إلى 4) وP (1 إلى 4) ، × P (2 إلى 3) ، الممثلين في هذا الشكل . يوجد تداخل يختلف معدله باختلاف المواقع النسبية للنقاط 1 و2 و3 و4 .

وإذا كانت 3 و 4 منطبقـتين في نقطة واحـدة (شكل ٧١)؟ لنقل إن الفوتونين يذهبان إلى 3 ، ولننظر كيف يؤثر ذلك في احتمال الحادث . لدينا الآن الجداءان : P (1 إلى 3) × P (2 إلى 3) وP (1 إلى 3) × P (2 × 3) ، وسهـماهمـا متطابقـان . فعندما نجمعهما يكون طول مجموعهما مساوياً ضعفي طول أحدهما ، ومربع السهم النهائي يساوي أربعة أضعاف مربع أحدهمـا . وبما أنهمـا منطبقـان فهـما يتواليان دوماً على مستقيم واحد . وبتعبير آخر ، يزول التفاوت التداخلي الناجم عن انفصال 1 عن 2؛ أي أن التداخل بنّاء دوماً . ولو تناسينا أن تداخل هذين الفوتونين جمعي دوماً ، تتوقع أن نحصل ، وسطيا ، على احتمال مضاعف ؛ وبدلا من ذلك نحصل دوما على احتمال أكبر بأربع مرات . وكلما ازداد عدد الفوتونات ازدادت القيمة اللامتوقعة للاحتمال .

ومن ذلك نستنتج عـدداً من المفـعـولات العـمليـة . نسـتطيع أن نقـول إن الفوتونات تنزع إلى «التـواجد» في ظرف واحـد أو بتعبير أدق ، في «حالة» واحدة

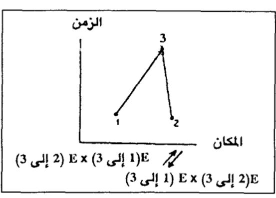
(نقصد بهذه الكلمة التوزع المكاني لسعات احتمال كشف الفوتون) . فالذرة التي تملك إمكانية إصدار فوتون في حالة ما ، يزداد احتمالها في فعل ذلك إذا كان يوجد سلفاً فوتون في تلك الحالة . وهذه هي ظاهرة «الإصدار المحفوز» الذي اكتشفه أينشتاين عندما قدم النظرية الكمومية مقترحاً النموذج الفوتوني في بنية الضوء . وعلى أساس هذه الظاهرة تعمل الليزرات Lasers.



شكل (٧١)

عندما تنطبق معا النقطتان 3و 4 يصبح للسهمين ـ P (1 إلى 3) × P (2 إلى 3) وP (2 إلى 3) × P (1 إلى 3) ـ طول واحد واتجاه واحد . ونجد بجمعهما سهماً ذا طول مضاعف ، وبتربيعه ، احتمالاً أكبر بأربع مرات . وهذا يعني أن الفوتونات تنزع إلى الذهاب نحو نقطة واحدة من الزمكان . وهذا النزوع يشتد بازدياد عدد الفوتونات ، إن الليزر يعمل بهذا المبدأ .

وتحدث الظاهرة نفسها لإلكتروناتنا الوهمية ذات السبين الصفري . أما في عالم الحقيقية ، حيث الإلكترونات مستقطبة ، فنلاحظ شيئا مختلفاً جداً : أن أحد السهمين ، E (1 إلى 3) × E (2 إلى 4) و E (1 إلى 4) × E (2 إلى 3) ، ينطرح من الآخر ـ أي يُعكس اتجاه أحدهما قبل جمعه مع الآخر . وإذا انطبقت النقطتان معاً، يصبح للسهمين طول واحد واتجاه واحد ، فينعدمان بالطرح (شكل (٧٢)) . وهذا يعني أن الإلكترونات ، بخلاف الفوتونات ، لا تحب «التواجد» في مكان واحد ، إنها تتحاشى بعضها إلى أقصى حد ـ لا يمكن أن يوجد إلكترونان باستقطاب واحد في نقطة واحدة من الزمكان ـ وهذا ما يسمى «مبدأ الانتفاء exclusion».



شكل (٧٢)

إذا حاول الكترونان (لهما استقطاب واحد) الذهاب إلى نقطة واحدة من الزمكان ، يكون التداخل سلبياً دوما : يؤدي طرح السهمين المتطابقين ـ E (1 إلى 3) × E (2 إلى 3) و E (2 إلى 3) × E (1 إلى 3) ـ إلى سهم حاصل طوله معدوم ، وبالتالي ، إلى احتمال معدوم . إن عزوف الالكترونات عن الذهاب إلى نقطة واحدة من الزمكان يسمى «مبدأ الانتفاء» (إن وجود إلكترون في نقطة ينفي وجود إلكترون آخر فيها) ، وهو الذي يعلل وجود تلك التشكيلة الغنية من أنواع الذرات في العالم .

ومبدأ الانتفاء هذا كامن في أعماق شتى الخواص الكيمائية للذرات . فالبروتون الذي يتبادل فوتونات مع إلكترون يرتعش حوله يؤلف ما نسميه ذرة هدروجين . والبروتونان المنتميان إلى ذرة واحدة ويتبادلان فوتونات مع إلكترونين (مستقطبين في اتجاهين متضادين) يؤلفان ذرة هليوم . وهكذا ترون أن للكيميائيين طريقة في العدِّ معقدة بعض الشيء : فهم بدلاً من «واحد ، اثنين ، ثلاثة ، أربعة ، خمسة بروتونات» يقولون «هدروجين ، هليوم ، ليتيوم ، بيريليوم ، بور» .!

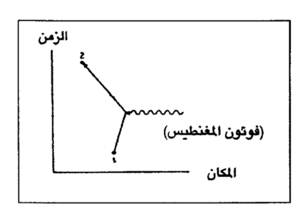
ليس للإلكترونات سوى حالتي استقطاب اثنتين . فالذرة التي تحوي نواتها ثلاثة بروتونات تتبادل فوتونات مع ثلاثة إلكترونات ـ منظومة تسمي ذرة ليتيوم ـ يكون الإلكترون الثالث أبعد عن النواه من الاثنين الآخرين (اللذين يحتلان كل المكان القريب من النواة) وتتبادلان فوتونات أقل عدداً .فهذا الإلكترون يستطيع إذن ، بسهولة أكبر ، أن يقطع صلته مع النواة بتأثير فوتونات تأتيه من ذرات أخرى . ومن هذه الذرات المتجاورة عدد كبير يفقد بسهولة إلكترونه الثالث المنفرد . وهذه الإلكترونات المتحررة تؤلف بحراً تستحم فيه الذرات . وهذا البحر من الإلكترونات يتأثر بأضعف قوة كهربائية (بفوتونات) فيتولد تيار إلكترونات ، وهذا سبب الناقلية الكهربائية التي يملكها معدن الليتيوم . أما ذرات الهدروجين والهليوم فلا تفقد إلكتروناتها بتأثير الذرات الأخرى المجاورة ، ولذلك كان الهدروجين والهليوم «عازلين» للكهرباء .

إن الذرات ـ بأجناسها المختلفة التي تقارب المئة ـ تنطوي على بروتونات تتبادل فوتونات مع إلكترونات عددها يساوي عدد البروتونات . وفي تشاركاتها تتخذ تشكيلاتٍ معقدة ذات خصائص رائعة في تنوعها : بعضها معادن ، وبعضها الآخر عوازل ، منها الغازي ومنها المتبلور ؛ فيها الطريُّ وفيها القاسي ؛ منها الملوّن، ومنها الشفاف – إنها تشكيلة أصبغة ما على لوح رسام فنان ، فيها من الروائع والبدع ما تدين به لمبدأ الانتفاء ولتكرار تلك النهوج الثلاثة فائقة البساطة P (A إلى B) و E (A إلى B) و j (لو كانت الإلكترونات في عالم الواقع غير ذات استقطاب لكانت الذرات كلها ذات خصائص متشابهة تماماً :كانت الإلكترونات ستتجمع كلها قرب نوى ذراتها ويكون من الصعب على الذرات الأخرى أن تجذبها لتُشركها في تفاعلات كيميائية) .

إن من حقكم أن تندهشوا من أن نهوجاً على تلك الدرجة من البساطة تولِّد عالَماً على هذه الدرجة من التنوع والتعقيد . لكن الظواهر التي نشاهدها في هذا العالم هي نتائج تشابكات مذهلة ذات آلاف مؤلفة من التبادلات الفوتونية والتداخلات . وليست النهوج الثلاثة الأساسية سوى بدء في تحليل ظرف واقعي فيه من عدد التبادلات الفوتونية ما يجعل الحساب مستحيلاً ـ والخبرة المكتسبة وحدها قادرة على إرشادنا إلى أهم الإمكانيات المتاحة . ولهذا السبب اخترعنا حيلاً مثل «قرينة الانكسار» و «الانضغاطية compressibility» و «القيمة الاتجادية valence» ، للمساعدة في إجراء حساب تقريبي ، دون الدخول في كل التفاصيل العميقة . إن هذا يُذكِّر بالفرق بين معرفة قواعد الشطرنج (أساسية وبسيطة) وبين حُسن اللعب بالشطرنج ؛ فاللعب يتطلب تقدير نتائج كل وضعية ونقلة (وهذه سوية من المعرفة أعلى بكثير جداً وأصعب منالاً) .

إن ميادين الفيزياء التي نهتم فيها بمسائل مثل : لماذا كان الحديد (٢٦ بروتوناً) مغنطيسياً في حين أن النحاس (٢٩ بروتوناً) غير مغنطيسي؟ أو لماذا كانت بعض الغازات شفافة وبعضها غير شفاف؟ إن هذا الفرع من العلم يحمل اسم «فيزياء الجسم الصلب» أو «فيزياء الموائع» أو أيضاً «الفيزياء ذات الوجه البشري» . أما مجال الفيزياء الذي نهتم فيه بتلك النهوج البسيطة الثلاثة فيسمى «الفيزياء الأساسية» ـ لقد اختير هذا الأسم لتوليد . . عُقد لدى الفيزيائيين الآخرين! وأكثر المسائل أهمية هذه الأيام ـ وأجداها على العصيد العلمي ـ تنتمي إلى فيزياء الجسم الصلب . لكن هناك من قال ذات يوم أن لا شيء أفضل عمليا من نظرية جيدة ، والإلكترودیناميك الكمومي نظرية جيدة بالتأكيد! .

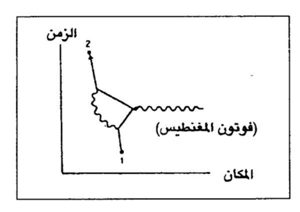
أحب أخيراً أن أعود إلى العدد 21 652 159 1.001 الذي تكلمت عنه في محاضرتي الأولى وذكرت أنه قيس وحُسب بعناية كبيرة . إن هذا العدد يمثل استجابة الإلكترون لحقل مغنطيسي خارجي ـ شيئاً نسميه «العزم المغنطيسي» . كان ديراك ، وهو أول من وضع القواعد لحساب هذا العدد ، قد استخدم الوصفة من أجل E (A إلى B) وعثر على نتيجة بسيطة سأتخدها ، في وحداتنا القياسية ، مساوية ١ . والبيان المتعلق بهذا الاقتراب الأولي من العزم المغنطيسي للإلكترون بسيط جداً: إلكترون يذهب من نقطة لأخرى في الزمكان ويقترن مع أحد فوتونات مغنطيس (شكل ٧٣) .



شكل (٧٣)

إن البيـان المقـابل للحسـاب الذي أجـراه ديراك للحصـول على العزم المغنطيسي للإلكترون بسيط جداً. وتُعطى القيمة 1 للعزم المحسوب من هذا البيان.

وبعد بضع سنوات شعرنا أن هذا العزم المغنطيسي لا يساوي 1 بالضبط بل أكثر بقليل - شيئاً مثل 1,001. كان شوينغر قد حسب التصحيح، j × j مقسوماً على π 2، في عام ١٩٤٨، وهو ينتج عندما تؤخذ في الحساب إمكانية أخرى متاحة للإلكترون كي يذهب من نقطة لأخرى: فبدلاً من أن يفعل ذلك مباشرة يذهب الإلكترون فجأة، وكأن شيئاً لم يكن، إلى مكان يُصدر فيه فوتوناً، ثم (يا للفظاعة!) يعود فيمتصه (شكل ٧٤). قد يكون هذا تصرفاً من الإلكترون «غير أخلاقي» لكنه يفعله مع ذلك! وحساب السهم المتعلق بهذا الأسلوب يقتضي صنع سهم لكل موضع يمكن للإلكترون أن يُصدر فيه فوتونه ولكل موضع يمكن أن يمتصه فيه. وهذا يستدعي إضافة اثنين من E (A إلى B) و P (A إلى B) وواحد أو اثنين من j، تُضرب كلها معاً. ويتعلم طلاب ما بعد الإجازة هذا الحساب في مقدمة دروس الإلكتروديناميك الكمومي.



شكل (٧٤)

تدل التجربة على أن العزم المغنطيسي للالكترون لا يساوي 1 بالضبط، بل أكثر بقليل. وهذا ناجم عن وجود أساليب متاحة أخرى: يمكن للالكترون أن يصدر فوتونا ثم يمتصه - مما يستلزم اثنين من E (A إلى B) و P (A إلى B) واحد، وجداء اثنين إضافيين من j. والتصحيح الناجم عن هذا الأسلوب، كما حسبه شوينغر، يساوي j × j مقسوما على 2π. ولما كان من المتعذر أن نميز تجريبياً هذا الأسلوب عن الأسلوب الأول - الكترون ينطلق من النقطة 1 ويصل إلى 2 - لابد من جمع السهمين المتعلقين بالاسلوبين، ويحصل تداخل.

ولكن تمهلوا قليلاً : إن تجارب قياس سلوك الإلكترون دقيقة لدرجة تستدعي التفكير أيضاً بأساليب أخرى في حساباتنا ، كإمكانيات أن يقوم الإلكترون ، في أثناء ذهابه من نقطة لأخرى ، بأربع اقترانات إضافية (شكل ٧٥) . يمكن للإلكترون أن يُصدر فوتوناً ويمتصه بثلاث طرائق مختلفة . ويوجد أيضاً إمكانية جديدة مثيرة (مثلناها في يمين الشكل ٧٥) ، هي أن يصدر الإلكترون فوتوناً يتحول بعدئذ إلى زوجي إلكترون/ بوزتزون - ومرة أخرى ، ولو سمحتم هنا بهذا التعبير ، يعمد الالكترون والبوزترون إلى إفناء بعضهما بعضاً ،فيولدان فوتوناً جديداً يمتصه الإلكترون في النهاية . لابد من أخذ هذه الإمكانية بعين الاعتبار .

شكل (٧٥)

لقد أصبحت النتائج التجريبية دقيقة لدرجة اقتضت حساب أساليب أخرى متاحة تنطوي على أربعة اقترانات إضافية (وهذا من أجل كل النقاط المرحلية الممكنة من الزمكان) ، وقد مثلنا بعض هذه الأساليب هنا . وفي البيان المرسوم في اليمين فوتون يتفكك إلى زوجي إلكترون/ بوزترون (عملية موصوفة في الشكل (٦٤)) يتفانيان ليعطيا فوتوناً جديداً يمتصه الالكترون .

لقد اضطر فريقان فيزيائيان «مستقلان» إلى قضاء عامين لحساب هذا التصحيح الجديد ، وعاماً ثالثاً لاكتشاف خطأ فيه - كانت التجارب قد أعطت قيمة مختلفة قليلاً عن القيمة الحسابية فتولد ، لفترة ما وللمرة الأولى ، الظن بأن النظرية غير متفقة مع التجربة ، ولكن كلا : كان الأمر مجرد خطأ في الحساب . ويمكن أن نتسائل كيف أمكن لفريقين أن يرتكبا الخطأ نفسه . الواقع أن الفريقين كانا ، قبل إنجاز الحساب بقليل ، قد قارنا نتائجهما فأصلحا ما كان بينهما من خلاف . فهما إذن لم يكونا مستقلين تماماً .

وهذا وإن وجود ستة مضاريب من j يعني مزيداً من الأساليب في وقوع الحادث ، وأرسم لكم تواً بعضاً منها (شكل ٧٦) . وقد اقتضى الأمر عشرين عاماً للحصول على هذه الدقة الإضافية في القيمة النظرية للعزم المغنيطيسي للإلكترون .

وفي أثناء ذلك تفنن التجريبيون في «تنعيم» قياساتهم، فأضافوا بضعة أرقام معنوية للنتيجة - التي ظلت متفقة مع النظرية.

وهكذا، نرسم لإجراء هذه الحسابات بيانات نترجمها إلى لغة رياضية ونجمع السعات معاً - إنها «وصفة طبخ» آلية. ويمكن إذن إجراؤها في الآلات الحاسبة. وقد تم، في الحواسيب الفائقة هذه الأيام، إنجاز حساب الحد الذي يحوي ثمانية مضاريب إضافية من j والعدد النظري هو اليوم :46 652 159 1.001، أما التجربة فتعطي 1,001 21 652 159 بارتياب قدره 4 في الرقم الأخير. ويعود بعض الارتياب في القيمة النظرية (وهو تقريبا 4 على الرقم الأخير) إلى ما يرتكبه الحاسوب في «تدوير» الأرقام، أما الجزء الأكبر (قرابة 20 على الرقمين الأخيرين) فيعود إلى أن قيمة j ليست معروفة بالضبط. والحد الذي يحوي ثمانية إضافية من j يمثل قرابة عشرة آلاف بيان، كل منها ذو خمسمئة حد - حساب جنوني قيد الإجراء الآن.

شكل (٧٦)

تجري الآن حسابات تهدف إلى مزيد من التحسين في دقة القيمة النظرية. والاسهام الناجم في السعة، الذي يمثل كل الامكانيات المنطوية على ستة اقترانات إضافية، يتضمن سبعين بياناً رسمنا ثلاثة منها هنا. ففي عام ١٩٨٣ كانت القيمة النظرية هي 46 652 159 1.001، بارتياب قيمته 20 على الرقمين الأخيرين، والعدد التجريبي كان 21 652 159 1.001، بارتياب قيمته 4 على الرقم الأخير. وهذه الدقة تكافىء قياس المسافة بين لوس انجلوس ونيويورك، وهي أكثر من 5000 كيلومتر، بارتياب قدره ثخن شعرة واحدة.

إنني على يقين من أننا سنتمكن، في غضون سنوات قليلة قادمة، من إضافة بضعة أرقام عشرية، سواء إلى القيمة التجريبية أو القيمة النظرية للعزم المغنطيسي للإلكترون. ولئن كنت لا أملك الحق في التأكيد بأن هاتين القيمتين ستظلان دوماً على وفاق، فما ذلك إلا لأن رجل العلم لا يستطيع البتة أن يقول ذلك قبل إجراء الحساب وتنفيذ التجارب.

وهكذا نكون قد أنجزنا العودة إلى العدد الذي كنت اخترته كي أُذهلكم منذ بدء هذه المحاضرات . والآن أعتقد أنكم فهمتهم ، أو آمل ذلك ، مغزى الإلحاح على هذا العدد : إنه يمثل في حقيقة الأمر مدى الصحة المدهش الذي بلغته نظرية الإلكتروديناميك الكمومي الموضوعة باستمرار على محك التجربة .

لقد كان أحد أهدافي الممتعة ، في هذه المحاضرات ، أن أُريكم أن الثمن الواجب دفعه لحساب نظرية على هذه الدرجة من الدقة كان تبدل مفهومنا المنطقي للأمور . علينا أن نتقبل من الطبيعة تصرفات عجيبة جداً : احتمالات تتزايد وتتناقص ، انعكاس الضوء بكل أجزاء المرآة ، سير الضوء في طرق غير الخط المستقيم ، فوتونات تسير بأسرع أو بأبطأ من سرعة الضوء المتعارف عليها ، الإلكترونات التي تعود القهقرى في الزمن ، الفوتونات التي تتفكك فجأة إلى زوجي إلكترون/ بوزترون ، وهكذا دواليك . ذلك ما يجب أن نذعن لقبوله إذا أردنا أن نفهم ما تفعله الطبيعة حقاً في أعماق معظم الظواهر التي نلحظها في هذا العالم .

وهكذا أكون قد شرحت لكم ، باستثناء تفاصيل الاستقطاب التقنية ، الإطار الذي يتيح لنا أن نفهم كل هذه الظواهر : نرسم السعات من أجل كل الأساليب المتاحة لوقوع الحادث المدروس ، ثم نجمعها معاً ، وذلك في ظروف عادية نتوقع أن تستوجب جمع الاحتمالات ، أو أن نضرب السعات معاً في ظروف نتوقع أن تستوجب ضرب الاحتمالات . لكن تناول ذلك كله بطريقة السعات لا بد أن يطرح بعض الصعوبات في البدء ، بسبب ما يبدو في هذه السعات من سمات مختلفة . لكننا في زمن قصير نتعود هذه اللغة المستغربة . وفي أعماق الحشد المتنوع من الظواهر التي نراها يومياً لا يوجد سوى ثلاثة نهوج أساسية : يتمثل أحدها بعدد الاقتران البسيط j ، ويتمثل الآخران بوصفتين P- (A إلى B) و E (A إلى B) بينهما صلة وثيقة . هذا كل ما في الأمر ، ومنه تخرج كل قوانين الفيزياء الأخرى .

بيد أنني أود أن أُضيف بضع ملاحظات قبل أن أُنهي هذه المحاضرة . فلئن كان بالامكان فهم روح الإلكتروديناميك وطبائعه ، دون ذكر تفاصيل الاستقطاب التقنية ، إلا أنني على يقين من أنكم قد تشعرون ببعض الأسف إذا لم أُضف شيئاً بخصوص ما استبعدته حتى الآن . واقع الأمر أن الفوتونات تتخذ أربع حالات مختلفة ، تُسمى استقطابات ، وتتصل هندسياً باتجاهات محاور الزمكان . يوجد إذن

فوتونات مستقطبة وفق الاتجاهات T,Z,Y,X . (ربما كنتم قد قرأتم، قبل الآن وفي كتاب ما، أن الضوء ليس له سوى حالتين استقطابيتين - إن الفوتون الذاهب باتجاه Z ،مثلاً، يمكن أن يكون مستقطباً عرضانياً باتجاه X أو باتجاه Y . حسناً ولكنكم تتوقعون ما يلي: عندما يقطع الفوتون مسافة كبيرة ويبدو ذاهباً بسرعة الضوء، فإن سعتي الحدين T,Z تُعدِّل إحداهما الأخرى. أما في حال الفوتونات الوهمية، الذاهبة في الذرة من بروتون إلى إلكترون، فإن إسهام T هو الأعظم).

وللإلكترون، على غرار ذلك، أربع حالات لها أيضا صلة بالهندسة، لكنها صلة أكثر عمقاً. لنرمز لهذه الحالات بـ 1، 2، 3، 4. إن حساب سعة مرور الإلكترون من نقطة A إلى نقطة B في الزمكان تتعقد، بسبب بروز أسئلة من النوع: «ما هي سعة أن يذهب فوتون، هو في الحالة 1، من A ويصل إلى B وهو في الحالة 2؟» إن التراكيب الثنائية، بهذا الصدد والتي عددها ستة عشر - الآتية من أربع حالات بدئية متاحة للإلكترون وهو في A وأربع حالات نهائية متاحة وهو في B - تدخل بشكل رياضي بسيط في الوصفة التي تعطي E(A إلىB) الذي تكلمت عنه.

لكن هذا النوع من التحوير غير ضروري من أجل الفوتون. فالفوتون المستقطب باتجاه X وهو في A يظل مستقطباً باتجاه X وهو في B، حيث سعة وصوله P (A إلى B).

إن الاستقطاب يولِّد عدداً من الاقترانات المتاحة المختلفة. إذ يمكن مثلاً أن نتساءل: « ما سعة أن يمتص إلكترون في الحالة 2 فوتوناً مستقطباً باتجاه X ليصبح إلكتروناً في الحالة 3؟» إن هذه التراكيب المتاحة، من إلكترونات وفوتونات مستقطبة، لا تنفصم كلها، لكنها عندما تنفصم تفعل ذلك بالسعة نفسها j مصحوبة أحياناً بتدوير إضافي للسهم قيمته أضعاف 90°.

نستطيع أن نستنتج، بأناقة بالغة، كل هذه الإمكانات من أجل شتى أنواع الاستقطاب، وكذلك نوع اقتراناتها، انطلاقاً من مبادىء الإلكتروديناميك الكمومي ومن فرضيتين إضافيتين هما :1) إن تدوير كامل العتاد التجريبي، ليتخذ اتجاهاً آخر، لا يؤثر في نتائج التجربة، ٢) إن إجراء التجربة بعتادها في مركبة فضائية متحركة بسرعة ثابتة لا يؤثر في نتائجها (مبدأ النسبية reIativity).

إن هذا التحليل الأنيق، والعام جداً، يدل على أن كل جسيم يجب أن ينتظم في أحد أصناف الاستقطاب الممكنة، وأصناف الاستقطاب هي: سبين spin O،

سبين 1/2 ، سبّين 1 ، سبين 3/2 ، سبين 2 ، وهكذا دواليك . وأبْسطها الجسيمات ذات السبين الصفري ، فليس للجسيم منها سوى مركبة واحدة ، والواقع أنها ليست مستقطبة بالمرة . (إن الإلكترونات والفوتونات الوهمية التي تناولناها في هذه المحاضرة هي جسيمات ذات سبين صفرى . ونحن لم نعثر قط حتى اليوم على جسيم أساسي ذي سبين صفري) . والإلكترون الحقيقي مثال على جسيم سبينه 1/2، والفوتون الحقيقي جسيم سبينه 1 . وللجسيمات التي سبينها 1/2 ، كتلك التي سبينها 1 ، أربع مُركّبات . أما الجسيمات الأخرى فلها مركبات أكثر ، عشر مثلاً للجسيمات التي سبينها 2.

ذكرتُ أن العلاقة بين النسبية والاستقطاب بسيطة وأنيقة ، لكنني غير واثق من أن أستطيع شرحها لكم ببساطة وأناقة! (يلزمني من أجل ذلك إضافة محاضرة أخرى على الأقل) . ورغم أن تفاصيل الاستقطاب ليست ضرورية لفهم روح الإلكتروديناميك الكمومي وطبعه ، إلا أنها جوهرية لإجراء الحساب المضبوط لعملية حقيقية ، ولها في معظم العمليات آثار عميقة .

لقد تناولنا في هذه المحاضرات خصوصاً تفاعلات بسيطة نسبياً بين الإلكترونات والفوتونات على مسافات قصيرة وليس فيها سوى عدد محدود من هذه الجسيمات . لكنني أُحب أن أُضيف ملاحظة أو اثنتين بخصوص تجلّيات هذه التفاعلات في سُلّمنا البشري حيث تحصل تبادلات لعدد كبير جداً جداً من الفوتونات . فحساب الأسهم في هذا السُّلم يصبح معقداً جداً.

على أننا نصادف أحياناً ظروفاً ليس في تحليلها صعوبة كأداء . من هذه الظروف مثلاً ما ينطوي على سعة إصدار للفوتون من المنبع مستقلة عن إمكانية إصدار فوتون سابق . وهذا ما يمكن أن يتحقق إذا كان المنبع كبير الكتلة جداً (كنواة الذرة) أو عندما يحوي عدداً كبيراً من إلكترونات ذات حركة واحدة ، من الأعلى إلى الأسفل مثلاً في هوائي الاذاعة الراديوية ، أو في لفّات مغنطيس كهربائي . في هذه الأحوال يكون عدد الفوتونات الصادرة عظيماً . وكلها في حال واحدة . وفي مثل هذه الظروف تكون سعة أن يمتص إلكترون فوتوناً مستقلة عما يكون قد حدث من امتصاصات سابقة لدى هذا الالكترون أو سواه . فسُلوك مثل هذا النظام يتعين إذن تماماً بمجرد معرفة سعة امتصاص الإلكترون للفوتون ، وهي سعة لا تتعلق إلا بموضع الإلكترون في الزمكان . ولشرح ظروف من هذا القبيل يستخدم الفيزيائيون

كلمات من اللغة الدارجة ،فيقولون إن الإلكترون يتحرك في حقل خارجي . ويخصص الفيزيائيون كلمة «حقل fieId» للدلالة على مقدار لا يتعلق إلا بالموقع في المكان وفي الزمان . وكنموذج جيد عن ذلك سخونة (درجة حرارة) الهواء : إنها تتغير بحسب المكان واللحظة اللذين نجري فيهما القياس . وأخذ الاستقطاب بالحسبان يعني إضافة مُركّبات أخرى للحقل . (إن للحقل أربع مركبات - تقابل سعات امتصاص كل واحدة من حالات الاستقطاب وفق T,Z,Y,X ، التي يمكن أن يوجد فيها الفوتون - تسمى تقنياً الكمونات potentiaIs الاتجاهية والسُلَمية . وفي الفيزياء التقليدية - غير الكمومية - يكون من الأيسر استعمال توابع (دالات) تسمى حقولاً كهربائية ومغنطيسية مشتقة من تلك الكمونات) .

عندما يكون الحقلان ، الكهربائي والمغنطيسي ،متغيرين ببطء كاف ، تكون سعة سير الإلكترون مسافة طويلة جداً متعلقة بالطريق الذي يسلكه . وكما رأينا سابقاً في حال الضوء فإن أهم الطرق هي تلك التي تعطي لزوايا السعات المتعلقة بطرق متجاورة قيماً متجاورة . ومنه ينتج أن الجسيم لا يسير بالضرورة في خط مستقيم . وبذلك نكون قد عدنا إلى ميدان الفيزياء التقليدية البحتة حيث يُفترض وجود حقول تتحرك فيها الإلكترونات بما يجعل مقداراً معيناً ،يسميه الفيزيائيون «فعلا action» ، أصغرياً . (تسمى هناك هذه القاعدة «مبدأ الفعل الأصغري») . وهذا ، في مجال الظواهر المحسوسة ،مثال عما يُستنتج من قواعد الإلكتروديناميك الكمومي . ومن هذا المنطلق يمكن مواصلة التطوير في عدة اتجاهات ، لكن لا بد من إيقاف برنامج هذه المحاضرات عند مرحلة ما . وأريد فقط أن أذكركم بأن الظواهر ، كما نراها في السلم الكبير ، وكذلك الظواهر العجيبة المرصودة في السلم الصغير ، هي نتاج التفاعلات بين الإلكترونات والفوتونات ، وأنها تتفسر كلها ،في النهاية ، بنظرية الإلكتروديناميك الكمومي .

الفصل الرابع

مسائل معلقة

مسائل معلقة

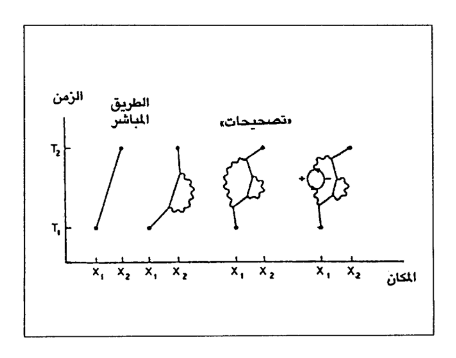
أَقسم هذه المحاضرة إلى قسمين. سأتكلم أولاً عن مسائل تخص الالكتروديناميك الكمومي نفسه، على فرض أن هذا العالم لا يحوي سوى إلكترونات وفوتونات. ثم أتكلم بعدئذ عن صلة الإلكتروديناميك الكمومي بباقي الفيزياء.

إن ما يُذهل أكثر من أي شيء سواه في الإلكتروديناميك الكمومي هو اختراع تلك السعات والتعامل معها بشكليات لا معقولة يمكن أن نخشى منها صعوبات جمة. لكن الفيزيائيين مايزالون ، ومنذ أكثر من خمسين عاماً، يعدلون في هذه السعات إلى أن أَلِفُوها كل الأُلْفة. زد على ذلك أن الجسيمات الجديدة التي اكتشفناها، وما جلبته معها من ظواهر جديدة، تتكيف كلها وعلى الشكل الأكمل مع كل ما يمكن أن نستنبطه من شكليات السعات هذه، التي تقضي بأن احتمال الحادث هو مربع سهم نهائي يتعين طوله بطرق التعامل الغريبة مع مفردات الأسهم المعهودة (ومنها تنتج التداخلات وسواها). إن هذه «المنظومة» التي تعتمد على السعات تؤيدها التجارب دون أدنى شك. ولئن كان لكم الحق في أن تطرحوا ما تريدون من الأسئلة الفلسفية بصدد معنى هذه السعات (إذا كان لها أي معنى)، إلا أن الفيزياء علم تجريبي وأن هذه المنظومة تتفق مع التجربة، فمن المفيد لنا إذن أن . .

وفي الفيزياء صنف كامل من المسائل المرتبطة بالإلكتروديناميك الكمومي، والتي تبرز عندما نريد تحسين الطريقة لحساب حصيلات كل الأسهم الصغيرة - ولدينا تقنيات شتى بحسب الظروف - ويحتاج طالب ما بعد الإجازة إلي ثلاث سنوات أو أربع للسيطرة عليها. إنها قضية تقنية ولن أتوسع فيها أكثر مما فعلت. فكل ما يجب علينا عمله هو أن نسعى باستمرار لتحسين الطرائق التي تتيح تحليل ما تقوله النظرية حقاً في الظروف المختلفة.

لكن هنا مشكلة أخرى، ملازمة لنظرية الإلكتروديناميك الكمومي بالذات، استغرق التغلب عليها عشرين عاماً. إنها تخص الإلكترونات والفوتونات المثالية وكذلك العددين n و j.

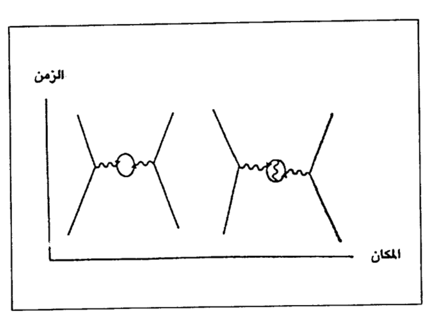
إذا لم يكن يوجد سوى إلكترونات مثالية ، لا تذهب من نقطة لأخرى إلا في الطريق المباشر (المرسوم في يسار الشكل (٧٧)) ، لا يكون في الأمر أية مشكلة : تكون عندئذ n كتلة الإلكترون ، وتكون j «حمولته» (سعة اقتران إلكترون بفوتون) التي يمكن أيضا تعيينها تجريبياً.



شكل (٧٧)

عندما نحسب سعة ذهاب إلكترون ، من نقطة لأخرى في الزمكان ، نستعمل الوصفة E (A إلى B) من أجل الطريق المباشر . (ثم نجري «تصحيحات» تأخذ في الحسبان إصدار وامتصاص فوتون أو عدة فوتونات) . إن E (A إلى B) يتعلق بـ (X2 - X1) وبـ (T2 - T1) وبـ n ، العدد الذي يجب إدخاله في الوصفة بما يضمن الحصول على نتيجة جيدة . يسمى العدد n «الكتلة السكونية» لالكترون «وهمي» ، ولا نستطيع قياسه تجريبياً لأن الكتلة السكونية للإلكترون الحقيقي ، m ، تحوي كل «التصحيحات» . وحساب n ، الواجب إدخاله في E (A إلى B) ، ينطوي على صعوبة خاصة استغرق تذليلها عشرين عاماً.

لكن الإلكترونات المثالية غير موجودة . والكتلة التي نقيسها في المختبر هي كتلة إلكترون واقعي يُصدر ويمتص الفوتونات الخاصة به بين وقت وآخر ، وتتعلق إذن بسعة الاقتران j . على أن «الحمولة» التي نقيسها تخص شحنة إلكترون واقعي مع فوتون واقعي قادر على تشكيل زوجي إلكترون / بوزترون من وقت لآخر : إنها تتعلق إذن بـ E (A إلى B) وبالتالي بـ n (شكل ٧٨) . ولما كانت كتلة الإلكترون وحمولته تتأثران بهذه الأحداث (وسواها) فإن الكتلة m والشحنة e ، المقيستين تجريبياً ، تختلفان عن n و j اللذين نستعملهما في حساباتنا .



شكل (٧٨)

إن سعة اقتران إلكترون بفوتون ، كما تُقاس بالتجربة ، عدد غامض ، e ، يحوي كل «التصحيحات» المتعلقة بفوتون يذهب من نقطة لأخرى في الزمكان ، تمثل هنا اثنين من هذه التصحيحات . أما في الحساب فيلزمنا عدد j لا يحوي هذه التصحيحات ولا يتعلق إلا بالفوتون الذي يذهب مباشرة . والصعوبة التي نصادفها في تعيين j تشبه تلك التي نصادفها في حساب قيمة n.

كان يمكن أن لا يكون في هذا الاختلاف مشكلة لو كنا نملك علاقة رياضية دقيقة بين n و j من جهة ، و m و e من جهة ثانية : كنا عندئذ نحسب ببساطة قيمتي n و j اللتين يجب الانطلاق منهما للحصول على قيمتي m و e التجريبيتين . (إذا وجدنا أن نتائج حساباتنا لم تتفق مع m و e ، ما علينا سوى أن نعبث قليلاً بـ n و j الأصليتين إلى أن يحصل الاتفاق) .

لندرس كيف نحسب m في حقيقة الأمر . نكتب سلسلة حدود ، تقريباً على شاكلة السلسلة التي صادفناها من أجل العزم المغنطيسي للإلكترون : الحد الأول خال من أي اقتران - إنه E (A إلى B) فحسب - ويمثل إلكتروناً وهمياً يذهب مباشرة من نقطة لأخرى في الزمكان . الحد الثاني يحوي اقترانين ويمثل إصدار فوتون وامتصاصه . ثم تأتي حدود ذات ستة اقترانات ، ثم ثمانية ، وهكذا دواليك (يمثل الشكل ٧٧ بعض هذه التصحيحات) .

ولحساب الحدود ذات الاقترانات علينا (كالعادة) تناول كل المحطات النقطية التي يمكن أن تحدث فيها هذه الاقترانات ، بما فيها حال انطباق نقطتي اقتران عندما تكون المسافة بينهما معدومة . لكن عندما نحاول إجراء الحساب حتى نهايته ، حتى

تنعدم المسافة ،نجد أن المعادلة يتعذر تطبيقها فتعطي أجوبة غير ذات معنى ـ أشياء لامتناهية في الكبر خصوصاً . وقد أثار هذا الأمر قلقاً كبيراً لدى ولادة الميكانيك الكمومي . كانت اللامتناهيات تظهر في نهاية كل حساب (كان إرضاء متطلبات التماسك الرياضي يقتضي الاستمرار في الحساب إلى أن تنعدم المسافة ، وعند هذه النهاية بالذات لا نجد لـ n أو لـ j أية قيمة تعطي نتيجة ذات معنى ، هنا تكمن المشكلة) .

وواضح أننا لو عدلنا عن التمسك بإجراء كامل الحساب الذي يأخذ بعين الاعتبار كل محطات الاقتران المتاحة حتى تبلغ المسافة صفراً ،فاوقفنا الحساب عندما تبلغ المسافة بين نقطتي الاقتران صغيرة جداً ـ لنقل ١٠^-٣٠ سنتيمتر ، أي أصغر بمليارات مليارات المرات من أصغر مسافة نشعر بها تجريبياً ، وهي اليوم ١٠^-١٦ سم ـ نجد عندئذ بالحساب قيمتين محدودتين لـ n و j تتيحان لكتلة الإلكترون وحمولته أن تأخذا القيمتين m و e المقيستين تجريبياً . لكن المزعج هنا هو أننا لو استمررنا في الحساب ـ إلى ١٠^-٤٠ سم مثلاً ـ نجد أن القيمتين المطلوبتين لـ j, n ، كي تعطيا e, m نفسيهما ، تصبحان مختلفتين عما سبق! .

لكن بيث H. Bethe ووايسكوبف Weiskopf لاحظا ،عام ١٩٤٩ ، أي بعد عشرين عاماً من حسابات ديراك ، ما يلي : إذا اضطلع شخصان باجراء الحسابات وتوقف كل منهما ، بخصوص صغر المسافة عند حد يختلف عن حد زميله وبما يتيح له تعيين قيمتين شخصيتين لـ n و j تتعلقان بـ m و e المقيستين ثم عمدا إلى حساب الجواب عن مسألة أخرى ـ معتمدين ، كلاً منهما ، على قيمته لـ n و j ـ فسيجدان ، بعد أن يأخذ كل منهما في الحسبان أسهم حدوده كلها ،جوابين شبه متطابقين للمسألة الأخرى! زد على ذلك أن هذا التطابق يتحسن كلما أمعن الشخصان في الاقتراب من الصفر بخصوص المسافة التي يوقف عندها تعيين n و j. ثم كان أن اخترعتُ ، بالاشتراك مع شوينغر وتوماناغا ، طرائق لإجراء الحساب إجراء عملياً ، وأكدنا أن ذلك كذلك فعلاً (ونلنا عليه جائزة) . وهكذا صار من الممكن إجراء حسابات في الإلكترودیناميك الكمومي! .

وهكذا يتأكد إذن أن الأشياء الوحيدة التي تتعلق بالمسافات القصيرة بين نقاط الاقتران هي قيمتا n و j ـ عددان نظريان لا يمكن على كل حال رصدهما مباشرة ، لكن يبدو أن ذلك لا يؤثر في أي من المقادير الأخرى الممكن رصدها .

إن عملية الاحتيال هذه لتعيين n و j تُسمى تقنياً «إعادة الاستنظام renormalisation» . ولكن أياً كان التفنن في هذه الكلمة فإن العملية بحد ذاتها حيلة جنونية . وقد كان اللجوء إلى هذا النوع من المخادعة هو الذي حال دون البرهان على تماسك نظرية الإلكتروديناميك الكمومي . ومن المؤسف أن لا نتوصل حتى اليوم إلى البرهان ، بشكل أو بآخر ، على الترابط المنطقي لهذه النظرية ؛ فأنا من جهتي ، أرتاب في الشرعية الرياضية لإعادة الاستنظام . والمؤكد أننا لا نملك طريقة رياضية جيدة لشرح نظرية الإلكتروديناميك الكمومي : فالاضطرار إلى الإكثار من تلك الكلمات للحديث عن العلاقة بين n و m ، ثم بين j و e ،يُثبت حقاً أن ذلك ليس من الرياضيات الجيدة(*).

وهناك مشكلة أخرى لا تقل أهمية عن تلك ، وتطرحها ثابتة الاقتران التجريبية e ـ سعة إصدار فوتون حقيقي ، أو امتصاصه ، من قبل إلكترون حقيقي . إنها مجرد عدد تحوم قيمته التجريبية حول 0,085 424 55 – . (إن زملائي الفيزيائيين لن يعترفوا بهذا العدد ، لأنهم يفضلُون أن يحفظوا عن ظهر قلب مقلوب مربعه: قرابة 137,035 97 بارتياب قدره 2 على الرقم الأخير . إن هذا العدد ما زال لغزاً منذ اكتشافه قبل أكثر من خمسين عاماً ، وكل فيزيائي جدير بهذا الأسم مهووس به) .

إن أول ما نرغب في معرفته هو أصل هذا العدد الاقتراني : هل له صلة بالعدد π ، أو ربما بأساس اللوغاريتمات الطبيعية؟ لا أحد يدري . إنه أحد الألغاز الكبرى في الفيزياء : عدد سحري ألقي على الانسان دون أن يفهم مما فيه شيئا . وما تم إلا بمشيئة الله عز وجل . ولئن كنا نعرف الوصفة التجريبية الواجب اتباعها لقياس هذا العدد ، إلا أننا لا ندري ما البرنامج الذي وضعناه حتماً في الحاسوب كي يخرج منه هذا العدد ، اللهم إلا أن نكون قد أدخلناه فيه بأنفسنا دسّاً.

لو كنا نملك نظرية جيدة لقالت لنا ، مثلاً ، إن e يساوي الجذر التربيعي لـ 3 مقسوماً على ضعفي مربع π ، أو شيئاً آخر من هذا القبيل . وقد شهدت الفيزياء ، من

(*) يوجد طريقة لتبرير هذه الصعوبة تقول بأن فكرة تجاور نقطتين بصورة لامتناهية قد تكون فكرة خاطئة ـ أي أن استخدام الهندسة إلى هذا الحد فرضية مغلوطة . فالاقتصار علي مسافة تصل في الصغر إلى $١٠^{-١٠٠}$ سم بين نقطتين (في حين أن أصغر ما صادفناه في التجارب حتى اليوم لا يقل عن $١٠^{-١٦}$ سم) يؤدي إلى زوال اللامتناهيات ، وهذا مؤكد ؛ لكن مُقلقات أخرى تظهر عندئذ ، منها أن الاحتمال الكلي لوقوع جميع الحوادث يصبح أكبر قليلاً ، أو أصغر قليلاً ، من 100% ، ومنها أن طاقات تظهر بكميات لامتناهية متناقصة . ويذهب بعضهم إلى أن هذه المزعجات ناجمة عن عدم أخذ مفعولات الثقالة في الحسبان ـ لأن هذه المفعولات ، برغم ضعفها الشديد جداً ، تصبح هامة عند النزول إلى مسافات أصغر من $١٠^{-٣٣}$ سم .

حين لحين، محاولات لتفسير قيمة e، إلا أن أياً منها لم تثبت نجاعتها، بدءاً من محاولة إدنغتون الذي «برهن» بالمنطق المجرد على أن العدد المفضّل لدى الفيزيائيين يجب أن يكون 136 بالضبط، القيمة التجريبية في ذلك العصر. وعندما دلّت التجارب الأدق على أن هذا العدد أقرب إلى 137 وجد إدنغتون خطأً ضعيفاً في محاكمته وبرهن، بالمنطق نفسه، على أن هذا العدد يجب أن يكون صحيحاً ومساوياً 137! وبعد حين شعر أحدهم أن تركيباً من π وe (أساس اللوغارتمات الطبيعية) و 2 و 5 يعطي ثابتة الاقتران الملغوزة تلك. لكن الناس الذين يلعبون بعلم الحساب لا يدركون دوماً إدراكاً جيداً الكثرة الكثيرة من الأعداد التي يمكن صنعها مع π وe، الخ. وتاريخ الفيزياء الحديثة مفعم بنشرات أناس ما كادوا يتوصلون إلى الحصول على قيمة الثابتة e بعدة أرقام عشرية مضبوطة حتى جاءت تجارب أخرى محسّنة تكذّب ما يدّعون.

وفي الوقت الحاضر لا بد من اللجوء إلى طرق حسابية عسيرة لحساب j، لكن ليس هناك ما يمنع الأمل بالتوصل ذات يوم إلى العثور على صلة رياضية شرعية بين j وe. عندئذ سيكون j هو العدد السحري الذي يأتي منه e. ولا شك أننا سنشهد عندئذ فيضاً من نشرات تشرح لنا كيف نحسب j بجرة قلم، وتحاول البرهان على أن j يساوي 1 مقسوماً على 4π مثلاً، أو شيئاً آخر من هذا القبيل.

وهكذا نكون قد انتهينا من عرض المسائل المعلقة في الإلكتروديناميك الكمومي.

لقد كنت، في أثناء إعداد هذه المحاضرات، أنوي أن لا أتكلم إلا عن الأقسام المعروفة جيداً في الفيزياء، أن أشرحها بتمامها وأن لا أتحدث عن أي شيء آخر. لكنني وقد وصلت إلى هذا الحد، وكأستاذ جامعي (وعاجز إذن عن السكوت في نهاية الدرس)، يصعب عليّ أن أقاوم الرغبة في أن أقول لكم شيئاً عن بقية الفيزياء.

عليّ، أولاً وفوراً، أن أقول لكم إن بقية الفيزياء لم تلق بعد من الشواهد التجريبية ما لقيه الإلكتروديناميك: فبعض الأشياء التي سأرويها فرضيات مؤكدة جيداً، لكن هناك أيضا نظريات لم تكتمل بعد وتكهنات بحتة. وهذا العرض، إذا قيس بالمحاضرات السابقة، سيبدو مصطنعاً بعض الشيء، سيكون منقوصاً وقليل التفاصيل. لكن من المؤكد أن بنية نظرية الإلكتروديناميك الكمومي تشكل قاعدة ممتازة للانطلاق إلى شرح ظواهر أخرى تنتمي إلى بقية الفيزياء.

سـأبدأ بالكلام عن البـروتونات والنتـرونات التي تؤلف نوى الذرات . فبـعـد اكتشافهما ظنهما الناس في بادىء الأمر جسيمين بسيطين عنصريين ؛ لكنهم تبينوا فيما بعد أنهما ليسا بسيطين إلى تلك الدرجة ـ وبكلمة بسيطين أقصد أن سعة ذهابهما من نقطة لأخرى يمكن تمثيلها بالوصفة E (A إلى B) بإدخال عدد n مختلف عما سبق . فيكون عندئذ للبروتون مثلاً عزم مغنطيسي قريب من 1 إذا حسبناه بطريقة حسابه من أجل الإلكترون . لكن القيمة الناجمة عن التجربة كبيرة بشكل غير مألوف : 2,79! وهذا يعني أن البـروتون يحـدث فيـه شيء لا تأخـذه بعين الاعـتـبـار مـعـادلات الإلكترودِيناميك ؛ الكمومي . والأنكى من ذلك النترون : فهـو ، كـجسيم حيـادي كهربائياً ، يجب أن لا ينفعل بالحقل المغنطيسي بتاتاً ، لكن الواقع أن له عزماً مغنطيسياً يساوي قرابة 1,39 ! وهكذا عرفنا ، منذ زمن طويل ، أن أمورا مريبة تحدث في النترون .

هذا وتنطرح أيضا مسألة معرفة ما يمسك بالنترونات والبروتونات معاً في نواة الذرة . وكان أن اقتنعنا سريعاً أن النواة لا يمكن أن تحتفظ بتماسكها بأسلوب تبادل فوتوني ، لأن هذا التماسك يتطلب قوى أشد بكثير ـ إن النسبة بين الطاقة اللازمة لكسر النواة والطاقة اللازمة لطرد إلكترون من الذرة تضاهي النسبة بين القدرة الانفجارية لقنبلة نووية وبين القدرة الانفجارية للديناميت : إن انفجار الديناميت ليس سوى إعادة توزيع لموكب الإلكترونات في حين أن انفجار القنبلة النووية إعادة توزيع للنترونات والبروتونات .

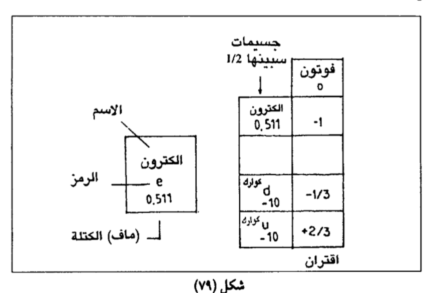
ولمزيد من المعرفة عن قوى التماسك في النواة أُجريت تجارب كثيرة يتلخص معظمها بإرسال بروتونات ، ذات طاقة متزايدة ، ترجم النوى بعنف . كان المتوقع أن لا نرى أكثر من انبثاق بروتونات ونترونات منها . لكن عندما أصبحت طاقة الراجم كبيرة جدا خرجت من النواة جسيمات جديدة . جاءتنا أولاً البيونات pions ، ثم الجسيمات لمدا Lambdas والجسيمات سغما sigmas والجسيمات رو rhos ، وما لبثنا أن استهلكنا حروف الأبجدية كلها في تسميتها . ثم فوجئنا بجسيمات منحناها أسماء ذات أعداد (كتلها) مثل سغما 1190 وسغما 1386 . فكان أن اتضح لنا أن عدد الجسيمات التي تصنعها الطبيعة غير محدود ويتعلق بمقدار طاقة الجسيم الراجم للنواة . وبين أيدينا الآن أكثر من أربعمئة جسيم من هذا القبيل . ومن المتعذر علينا أن نتقبل أربعمئة جسيم : إن هذا الأمر معقد أكثر من أن نستطيع احتماله(*).

إن من نخبة الباحثين رجالاً ، مثل موري غيل ـ مان M.Gell ـ Mann ، أجهدوا أنفسهم في استنباط قواعد سلوك كل هذه لجسيمات وخرجوا على الملأ ، في أوائل

(*) بالرغم من تولُّد جسيمات عديدة من النواة المرجومة بقذائف ذات طاقة عالية ، إلا أن التجارب العادية في طاقات الرجم المنخفضة لا تُظهر في النواة سوى بروتونات ونترونات .

السبعينات ، بنظرية كمومية في التفاعلات الشديدة (أو نظرية «الكرومودیناميك الكمومي» أو الاصطباغ الكمومي) chromo dynamics «ممثلوها» الرئيسيون جسيمات أسموها «كواركات quarks» . وقد قسموا الجسيمات المؤلفة من كواركارت إلى صنفين : الجسيمات التي ،مثل البروتون والنترون ، تتألف من ثلاثة كواركات (وأطلقوا عليها كأسرة ، الإسم الفظيع «باريونات «Baryons») أما جسيمات الصنف الثاني كالبيونات ، فتتألف من كوارك وكوارك مضاء (وتسمى «ميزونات») .

والآن أرسم لكم لوحة ذات بيوت تحوي الجسيمات الأساسية (العنصرية) كما تظهر لنا اليوم (شكل ٧٩) . وأبدأ بالجسيمات التي تذهب من نقطة لأخرى مطيعة الوصفة E (A إلى B) ـ مع تعديل من نوع قواعد استقطاب الإلكترون ـ وتسمى الجسيمات التي سبينها 1/2 . أول هذه الجسيمات الإلكترون ، وعدد الكتلي يساوي 0,511 وحدة من نوع جديد نتبناه بعد الآن ، وتسمى ماف Mev (أو مليون إلكترون فولت)(*).



شكل (٧٩)

يبدأ رسم لوحة كل جسيمات العالم بالجسيمات التي «سبينها 1/2» : الإلكترون (كتلته 0.511 ماف) وجسيمين «نكهتاهما» d و u (كتلة كل منهما قرابة 10 ماف) . والالكترونات والكواركات لها «شحنات» - أي أنها تقترن بالفوتونات بالشدات التالية (بالنسبة لثابتة الاقتران j-) : 1- ، 1/3- ،2/3 +.

أترك تحت الالكترون فراغاً (أملؤه فيما بعد) أضع تحته نوعين من الكواركات : d و u . ونحن لا نعرف الآن بالضبط كتلتي هذين الكواركين ، لكن بالإمكان أن نمنح كلاً منهما القيمة التقريبية المعقولة من رتبة 10 ماف . (إن كون النترون أثقل قليلاً من البروتون يدل على أن الكوارك d ـ كما سنرى بعد قليل ـ أثقل من الكوارك u) .

أكتب إلى جانب كل جسيم شحنته ، أو ثابتة اقترانه ، على شكل أضعاف من

(*) هي وحدة صغيرة جداً تلائم هذا النوع من الجسيمات ، وتعادل $1,78.10^{-27}$ غراماً تقريباً.

j – ، أي عدده الاقتراني مع الفوتونات بعد تغيير إشارته الجبرية . وهكذا تكون شحنة الإلكترون 1– ، وفق اصطلاح يعود إلى فرانكلين ونحن مضطرون إلى الالتزام به منذ ذلك العصر . إن سعة اقتران الكوارك d مع الفوتون تساوي 1/3– ، وتساوي ، من اجل الكوارك u، +2/3 . (لو كان فرانكلين قد عرف الكواركات لتدبر الأمر كي يمنح شحنة الالكترون القيمة 3– على الأقل) .

إن شحنة البروتون ، في هذا المقام ، هي +1 ، وشحنة النترون صفر . ولدينا من التجاريب ما أقنعنا سريعاً بأن البروتون ـ ثلاثة كواركات ـ لا يمكن إلا أن يكون مصنوعاً من كواركين u وكوارك واحد d ، بينما النترون ـ ثلاثة كواركات أيضا ـ مصنوع من كواركين d وواحد u (شكل ٨٠) .

شكل (٨٠)

لا يوجد في الواقع سوى صنفين من الجسيمات المؤلفة من كواركات : الجسيمات المؤلفة من كوارك وكوارك مضاد ، وتلك المصنوعة من ثلاثة كواركات ، وأكثر أعضائها شيوعاً البروتون والنترون . ولما كان هذان الجسيمان مصنوعين من جسيمات مشحونة متحركة، فإن هذا يفسر لماذا كان العزم المغنطيسي للبروتون أكبر من 1 ، وكذلك لماذا يملك النترون عزماً مغنطيسيا رغم حيادة كهربائيا .

u(+2/3)
u(+2/3)
d (-1/3)
(+1)
بروتون

d (-1/3)
d (-1/3)
u(+2/3)
(0)
نترون

ما الذي يمسك بالكواركات مترابطة معاً؟ هل هناك فوتونات تذهب بينها وتجيء؟ (إن الكواركين d و u ، كالإلكترونات ، بسبب شحنتيهما 1/3 ـ و +2/3، يُصدران فوتونات ويمتصانها) كلا ، إن القوى الكهربائية أضعف من أن تقوم بهذه المهمة . وقد وجب اختراع شيء آخر يمسك ، بذهابه وإيابه ، الكواركات مضمومة معاً . يسمى هذا الشيء «غليونات glouns»(*) والغليونات مثال آخر عن جسيمات ذات سبين يساوي 1 (كالفوتونات) ؛ إنها تذهب من نقطة لأخرى بسعة تتعين بالصيغة P (A إلى B) التي للفوتون نفسها . أما سعة إصدار الغليونات وامتصاصها لدى الكواركات فهو عدد g ، أكبر كثيراً من j شكل (٨١) .

(*) تأمل في هذه التسميات : «فوتون» يأتي من كلمة يونانية تعني الضوء ، «إلكترون» يأتي من كلمة يونانية تعني الكهرمان ، وهو أول راتنج أمكن كهربته . لكن أسماء الجسيمات ، في تقدم مسيرة الفيزياء ، تبرهن على جهل متزايد باليونانية القديمة لدى الفيزيائيين حتى تمادوا في نقيق كلمات مثل «غليون» . هل تعلمون من أين جاؤوا بهذا الاسم؟ الواقع أن d و u هما الحرفان الأوليان من كلمتي down (سفلي) و up (علوي) الانكليزيتين . ولكن لا تنخدعوا بهما ، فليس في هذا الأمر مرتبة سفلية وأخرى علوية . وبهذه المناسبة تدعى هذه الصفات «نكهات flavor» الكواركات!

جسيمات سبينها 1/2	فوتون	غليون
	o	o
الكترون 0,511	-1	O
	O	O
كوارك d -10	-1/3	g
كوارك u -10	+2/3	g

جسيمات سبينها 1

اقترانات

الاسم: الكترون

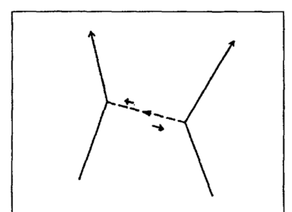
الرمز

(MeV) (ماف) الكتلة: 0,511

شكل (٨١)

إن «الغليـونات» تمسك بالكواركـات مـعـاً لتـشكيل البـروتونات والنترونات ، وهي مسؤولة مسؤولية غير مـباشـرة عن ترابط البـروتونات والنتـرونات في نوى الذرات . والغليوانات تربط ما بين الكواركات بقوة أشد بكثير من القوة الكهرطيسية . وثابتة اقتران الغليونات g، أكبر بكثير من j ، ولهذا السبب يكون حساب الحدود الحاوية اقـترانات أصـعب هنا بكثير : لم يمكن حـالياً الحصول على دقة أحسن من 10%.

إن بيانات الكواركات في تبادل الغليونات تشبه تماماً تلك التي كنا نرسمها بخصوص الإلكترونات في تبادل الفوتونات (شكل(٨٢)) . وهذا التشابه كبير لدرجة أنكم تستطيعون أن تتهموا الفيزيائيين بكساح الخيال - إنهم في سعيهم لصنع نظرية في التفاعلات الشديدة قد اكتفوا بنسخ الإلكترودیناميك الكمومي! وانتم في هذا الاتهام مصيبـــون ، فهذا هو حقاً ما فعلوه ، ولكنهم أدخلوا فيه مع ذلك تغييراً طفيفاً.

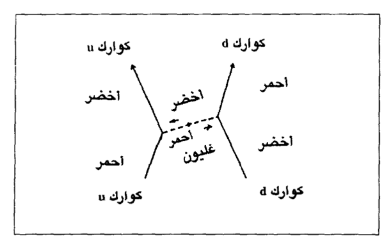


شكل (٨٢)

إن مخطط تبادل غليون بين كواركين يشبه إلى حد كبير مخطط تبادل فوتون بين إلكترونين ولدرجة أن تعتقدوا أن الفيزيائيين لم يفعلوا أكثر من نسخ الالكتروديناميك الكمومي لمعالجة «التفاعلات الشديدة» التي تربط الكواركات معاً ضمن النترون والبروتون ، صحيح أنها عمليه منسوخة ، لكن ليس كليا .

إن للكواركات ضرباً إضافيا من الاستقطاب وليس من طبيعة هندسية. والفيزيائيون الأُميون ، الذين استنفذوا كل الكلمات الإغريقية في معجمهم الفقير ، قد لجؤوا ، مع الأسف ، إلى كلمة «لون» للدلالة على هذا النوع من الاستقطاب الذي

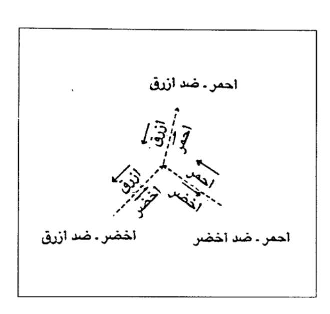
لا علاقة له بتاتاً بالألوان العادية . أي أن الكوارك ، في لحظة معينة ، يمكن أن يكون في إحدى حالات ثلاث ، أو «ألوان» ـ R أو V أو B (إحزروا الكلمات التي هذه حروفها الأولى) . إن «لون» الكوارك يمكن أن يتغير باصدار غليون أو بامتصاصه. ويوجد من الغليونات ثمانية أنواع مختلفة بحسب «الألوان» التي تقرن بها . الكوارك الأحمر (Red) ،مثلاً يصبح أخضر (Vert) بعد أن يُصدر غليونا «لونه» مزيج من أحمر وضد الأخضر (سنقول أحمر /ضد الأخضر) ـ أي غليون يأخذ الأحمر من الكوارك ويعطيه أخضره .(إن كلمة «ضد الأخضر» تعني أن الغليون يذهب بالآخضر في الاتجاه المضاد) . وهذا الغليون يمكن أن يمتصه كوارك أخضر فيتحول إلى أحمر (شكل ٨٣) . ويوجد ثمانية غليونات : أحمر / ضد الأحمر ، أحمر/ ضد الأخضر ، أحمر/ ضد الأزرق ، الخ . (تستطيعون أن تتوقعوا تسعة ، لكن يجب استبعاد واحد لأسباب تقنية) . وهذه النظرية ليست معقدة . فقاعدة سلوك الغليونات تتلخص بما يلي : إن الغليونات تقترن مع أشياء لها «لون» ـ يكفي أن نُجري عملية «محاسبة» بسيطة كي نعلم أين تذهب «الألوان» .



شكل (٨٣)

الفرق بين نظرية الغليونات والإلكتروديناميك الكمومي هي أن الغليونات تقترن بأشياء ذات «ألوان» (في واحدة من الحالات الثلاث) الممكنة ـ «حمراء» ، «خضراء» ، «زرقاء» . هنا كوارك u أحمر يتحول إلى أخضر بإصدار غليون أحمر/ ضد الأخضر يمتصه كوارك d أخضر فيتحول إلى أحمر . (عندما ينتقل «اللون» راجعاً في الزمن ، نلصق به البادئة «ضد») .

لكن هذه القاعدة تخبىء لنا إمكانية مثيرة : إن الغليونات يمكنها أن تقترن بغليونات أخرى (شكل ٨٤) . فإذا صادف الغليون الأخضر/ ضد الأزرق ، مثلاً ، غليوناً أحمر/ ضد الأخضر ، تحول إلى غليون أحمر/ ضد الأزرق . إن نظرية الغليونات بسيطة جداً ـ تصنعون رسماً وتتبعون «الألوان» . وفي كل البيانات التخطيطية تتعين شدة الاقترانات بثابتة اقتران الغليونات g.



شكل (٨٤)

بما أن الغليونات «ملونة» هي الأخرى فإنها تستطيع أن تقترن فيما بينها. هنا غليون أخضر/ ضد الأزرق يقترن مع غليون أحمر/ ضد الأخضر ليشكلا غليوناً أحمر/ ضد الأزرق. إن نظرية الغليونات سهلة على الفهم - يكفيك أن «تقتفي» الألوان.

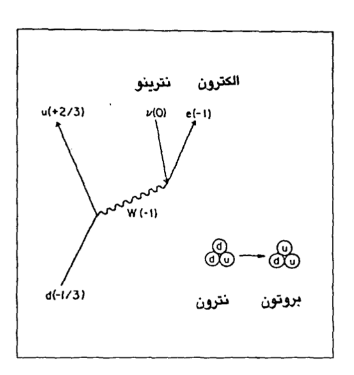
والحقيقة أن نظرية الغليونات لا تختلف شكلياً اختلافاً كبيراً عن الإلكتروديناميك الكمومي. فكيف إذن نقارنها بالتجربة؟ ما هي العلاقة مثلاً بين العزم المغنطيسي التجريبي للبروتون وقيمته المحسوبة من النظرية؟.

إن التجارب دقيقة جداً وهي تعطي لهذا العزم القيمة 2,792 75، ولا يمكن للنظرية أن تعطي أكثر من 2,7 بارتياب قدره 0,3 (مع كثير من التفاؤل بخصوص دقة التحليل)، أي بخطأ من رتبة 10%، وإذن بدقة أقل جودة بعشرة آلاف مرة من دقة القيمة التجريبية! فنحن إذن نملك نظرية بسيطة، واضحة المعالم نتوقع منها أن تفسر كل خصائص البروتونات والنترونات، ومع ذلك لا نستطيع أن نحسب بها شيئاً لأن الرياضيات اللازمة لذلك تفوق إمكاناتنا. (ويمكن أن تحزروا في أي ميدان أعمل هذه الأيام، ولا أتوصل إلى شيء) وسوء الدقة في حساباتنا يعود سببه إلى ثابتة اقتران الغليونات، g، الأكبر كثيراً من ثابتة اقتران الإلكترونات. وهذا يجعل الحدود التي تحوي اقترانين، أو أربعة، أو حتى ستة اقترانات، ليست مجرد تصحيحات صغيرة بل إسهامات كبيرة لا يصح إهمالها. فعدد الأسهم المتعلقة بهذه الكثرة من الأساليب المتاحة كبير لدرجة حالت دون النجاح في ترتيبها بشكل معقول للعثور على السهم النهائي.

إن الكتب تعرض شؤون العلم بصورة بسيطة : تضعون نظرية تقارنون نتائجها مع التجارب ، وإذا لم تفلح ترمونها في سلة المهملات وتصنعون نظرية أخرى . ونحن هنا لدينا نظرية أحكمنا صنعها وتجارب بالمئات ، لكننا لم نفلح في التوفيق فيما بينها! وهذا موقف لم تتعرض له الفيزياء قط في تاريخها . فنحن اليوم في مأزق سببه عجزنا عن اختراع طريقة للحساب ، وقد تكاثرت علينا الأسهم الصغيرة حتى أغرقتنا .

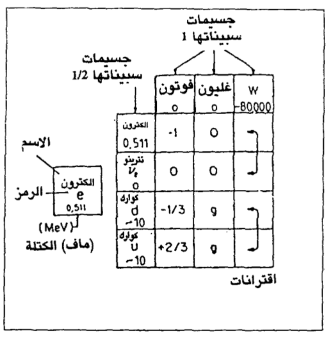
ورغم كل هذه الصعوبات التي تعترض إجراء الحسابات في الكروموديناميك الكمومي (نظرية التفاعلات الشديدة بين الكواركات والغليونات) فان فيه أشياء نفهمها كيفياً . منها أن كائناته ، المصنوعة من كواركات ، جسيمات «عديمة اللون» : إذ إن مضمومات الكواركات الثلاثة تحوي كواركاً من كل «لون» ؛ والأزواج ، كوارك/ كوارك مضاد ، لها سعة واحدة كي تكون أحمر/ ضد الأحمر أو أخضر/ ضد الأخضر أو أزرق/ ضد الأزرق . ومن هنا نفهم أيضاً لماذا لا نستطيع أن نعزل أو نصنع كواركاً مفرداً ـ لماذا لا نرى ، في عمليات رجم النواة ببروتونات ذات طاقة عالية متزايدة ، خروج كواركات مفردة ، بل نرى دفقات من الميزونات والباريونات (أزواج كوارك / كوارك مضاد ، أو ثلاثيات كواركية) .

إن الكرومودیناميك الكمومي وزميله الإلكترودیناميك الكمومي ليسا كل الفيزياء . وفي إطار هاتين النظريتين لا يمكن للكوارك أن يغير «نكهته» : إن الكوارك u يظل طول عمره كوارك u ، والكوارك d طول عمره كوارك d . لكن الطبيعة تتصرف أحيانا تصرفاً آخر ؛ فمن ظواهر النشاط الإشعاعي يوجد نشاط بطيء جداً ـ ذلك النوع الذي يقض مضاجع المشتغلين بالتفاعلات النووية ـ ويسمى الإشعاع بيتا beta ، ذلك الذي يجعل النترون ، مثلاً ، يتحول إلى بروتون . فلما كان النترون مصنوعاً من كواركين d وكوارك u ، والبروتون من كواركين u وكوارك d ، فان تحول النترون إلى بروتون يعني أن أحد الكواركين d في النترون يتحول إلى u (شكل ٨٥) . وإليكم كيف يحدث ذلك : إن الكوارك يُصدر «شيئاً» ، جديداً ، شيئاً يشبه الفوتون أسميناه W ، يقترن مع إلكترون ومع جسيم اخر جديد ، اسمه نترينو مضاد ، أي نترينو يصعد سلم الزمن القهقرى . والنترينو ، هو الآخر ، جسيم سبينه 1/2 (كالإلكترون والكواركات) لكنه عديم الكتلة وعديم الشحنة (لا يتفاعل مع الفوتون) ولا يتفاعل أيضا مع الغليونات ، إنه لا يقترن إلا مع W (شكل ٨٦) .



شكل (٨٥)

عندما يتفكك نترون إلى بروتون (وهي ظاهرة تسمى «التفكك بيتا») فإن الشيء الوحيد الذي يتغير هو «نكهة» كوارك - من d إلى u - مع إصدار إلكترون ونترينو مضاد. وهذه العملية بطيئة نسبياً، وهذا كان السبب في تصور وجود جسيم مرحلي (يسمى «البوزون المرحلي W») كتلته كبيرة جدا (قرابة 80 000 ماف) وشحنته 1-.

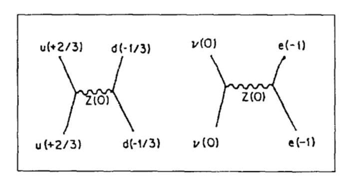


شكل (٨٦)

الجسيم W يقترن بالإلكترون والنترينو من جهة، وبالكواركين d و u من جهة أخرى.

إن W جسيم سبينه 1 (كالفوتون والغليون) ويغير «نكهة» الكوارك ويأخذ شحنته (الكوارك d الذي شحنته 1/3- ، يتحول إلى u شحنته 2/3+ ، أي بفرق قدره 1- ،لكنه لا يغير «لون» الكوارك) . ولما كان W يحمل شحنة سالبة مقدارها 1- (وجسيمه المضاد ، W^+ ، شحنة مقدارها 1+) فإنه يستطيع أيضاً أن يقترن مع الفوتون . هذا وبما أن الإشعاع بيتا يأخذ وقتاً أطول بكثير مما تأخذه تفاعلات الفوتونات والإلكترونات ، يُعتقد أن كتلة W لابد أن تكون كبيرة جداً (حوالي 000 80 ماف) ، بخلاف الفوتون والغليون . ولما كان إخراج جسيم له مثل هذه الكتلة يستلزم طاقة رجم عالية جداً ، لم يمكن حتى الآن رؤية الجسيم W مباشرة(*).

ويوجد جسيم آخر ، اسمه Z° ، يمكن أن يعتبر كجسيم W حيادي الشحنة . و Z° هذا لا يغير شحنة الكوارك ، لكنه يقترن مع الكوارك d ومع الكوارك u ومع الإلكترون ومع النترينو (شكل (٨٧)) .



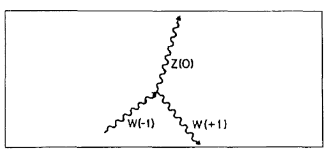
شكل (٨٧)

عندما لايحصل أي تغير في الشحنة بين الجسيمين ، يكون W غير مشحون (نسميه عندئذ Z°) . تسمى هذه التفاعلات «التيارات الحيادية» . رسمنا هنا إمكانيتين .

وهذا التفاعل يحمل اسماً رديئاً هو «التيار الحيادي» ؛ وقد أثار اكتشافه ، منذ بضع سنوات ، اهتمام الفيزيائيين . هذا وتكتمل نظرية الجسيمات W بصورة أنيقة جدا بإتاحة إمكانية اقترانات ذات ثلاثة فروع فيما بين أنواع W الثلاثة شكل (٨٨) . وثابتة الاقتران التجريبية من أجل W تشبه تماماً ثابتة اقتران الفوتون ـ من رتبة j. وعلى هذا فإن الجسيمات W الثلاثة يمكن أن لا تكون سوى مظاهر شتى لكائن واحد . وقد اضطلع محمد عبد السلام وستيفن واينبرغ S. Weinberg بضم الإلكتروديناميك الكمومي مع ما يسمى «التفاعل الضعيف weak interaction (ومن

(*) لقد أمكن ، بعد هذه المحاضرات ، بلوغ طاقة كافية لإنتاج الجسيم w ، وتبين أن كتلته ـ التي قيست ـ قريبة جدا من القيمة المتوقعة .

كلمة weak الانكليزية أتى الرمز W) كي يصنعا منهما نظرية كمومية واحدة(*)، لكننا نستطيع أن نقول إن نظريتهما هذه مازالت غير مكتملة الترابط! ولئن كان من المؤكد أن بين الفوتون والجسيمات W الثلاثة صلة قربى، بشكل أو بآخر، إلا أن هذه الصلة ماتزال حتى اليوم غير بينة المعالم تماماً ـ «الدرزة» مرئية، وماتزال هذه النظرية بحاجة إلى صقل يزيد في أناقة هذا التوحيد ويجعله أكثر صحة.



شكل (٨٨)

يمكن أن نواجه إمكانية اقتران بين W^-، وجسيمه المضاد W^+ و Z°. إن ثابتة اقتران الجسيمات W هي من رتبة j، مما يوحي بأن الجسيمات W الثلاثة والفوتون قد تكون وجوهاً مختلفة لكائن واحد.

إليكم إذن ما نحن فيه اليوم: يوجد في النظرية الكمومية ثلاثة أنواع من التفاعلات الرئيسية ـ «التفاعلات الشديدة Strong» للكواركات والغليونات، «التفاعلات الضعيفة» للجسيمات W، «التفاعلات الكهربائية» للفوتونات ـ والجسيمات الوحيدة في العالم، بموجب هذه الصورة، هي الكواركات (بـ «نكهتين»، u و d، لكل منهما ثلاثة «ألوان») والغليونات (ثماني مضمومات من R و V و B) والنترينوات والإلكترونات والفوتونات ـ أي قرابة عشرين جسيماً مصنفة في ستة أصناف (إضافة إلى جسيماتها المضادة). إنه عدد لا بأس به ـ عشرون جسيماً فقط ـ لكن هذا ليس كل شيء.

ذلك أننا نحصل على مزيد من أنواع الجسيمات الجديدة إذا زدنا كثيراً في طاقة البروتونات التي نرجم بها نواة الذرة. إن أحدها، وهو الميون muon، يماثل الإلكترون في كل شيء، إلا أن كتلته أكبر بكثير ـ 105,8 ماف، بدلاً من 0,511 ماف للإلكترون ـ أي أنه أثقل بقرابة مئتي مرة. وقد تعجلت حكمة الرحمن في إتاحة هذا العدد الجديد للكتلة! فكل خصائص الميون تتصف تماماً بما يقدمه

(*) تعرف اليوم هذه النظرية باسم نظرية التفاعل الكهرضعيف electroweak (المترجم).

الإلكترودیناميك الكمومي ـ ثابتة اقتران تساوي j ، الوصفة E (A إلى B) نفسها لكن n يأخذ فيها قيمة مختلفة(*).

زوجان: الكترون ـ بوزترون ـ
أو
ميون ـ ميون مضاد
ميون
الكترون

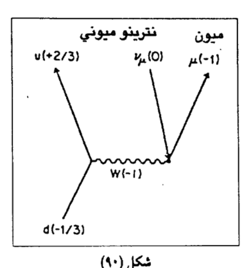
شكل (٨٩)

إن رجم نوى الذرات ببروتونات ذات طاقة عالية متزايدة يولّد جسيمات جديدة ، أحدها الميون ، أو الالكترون الثقيل . إن النظرية التي تصف تفاعلات الميون هي نفسها التي تصف تفاعلات الإلكترونات باستثناء وجوب إعطاء قيمة أعلى لـ n في E (A إلى B) . والعزم المغنطيسي للميون أعلى حتماً بقليل من عزم الإلكترون بسبب وجود أسلوبين خاصين : عندما يُصدر الإلكترون فوتوناً يتفكك إما إلى زوجي إلكترون / بوزترون وإما إلي زوجي ميون / ميون مضاد ، وكتل هذه الجسيمات تساوي أو تفوق كتلة الالكترون البدئي . وفي مقابل ذلك ، عندما يصدر الفوتون الذي يتفكك إلى زوجي ميون / ميون مضاد أو زوجي إلكترون / بوزترون ، فإن لهذه الجسيمات كتلاً تساوي كتلة الميون أو تقل عنها كثيراً . إن التجارب تؤكد هذا الفرق القليل .

ولما كانت كتلة الميون تساوي قرابة 200 ضعف من كتلة الإلكترون فان سرعة دوران «عقرب مزمان» الميون تعادل قرابة 200 ضعف من تلك المتعلقة بالإلكترون . وعلى هذا أمكن امتحان الإلكترودیناميك الكمومي على مسافات أصغر بمئتي مرة من ذي قبل ـ وأمام هذه النظرية هامش احتياطي يصل إلى ثمانين رقماً بعد الفاصلة العشرية قبل أن تعاني هذه النظرية من اللامتناهيات (انظر الحاشية رقم 1).

لقد ذكرنا أن الإلكترون والجسيم W يمكن أن يقترنا (شكل (٨٥)) ، فهل يتاح لـ W أن يقترن مع ميون ، بدلاً من إلكترون ، عندما يتحول الكوارك d إلى كوارك u مصدرا W؟ الجواب نعم (شكل (٩٠)) . وماذا بشأن النترينو المضاد؟ الواقع ، في حال اقتران W مع ميون ، أن جسيماً آخر اسمه النترينو الميوني يأخذ مكان النترينو العادي (ونسميه الآن النترينو الإلكتروني) حيث يكون . فلوحة جسيماتنا تحوي إذن جسيمين إضافيين ، إلى جانب الإلكترون والنترينو ـ هما الميون والنترينو الميوني .

(*) لقد قيس العزم المغنطيسي للميون بدقة جيدة جدا فتبين أنه يساوي 924 165 1,001 (بارتياب قيمته 9 على الرقم الأخير) ، في حين أن العزم المغنطيسي للإلكترون يساوي 21 652 159 1,001 (بارتياب قدره 3 على الرقم الأخير) وهنا تتساءلون دون شك عن سبب الزيادة الضئيلة في القيمة التي تخص الميون . إن في أحد البيانات التي رسمتها كان الإلكترون يصدر فوتونا يتفكك إلى زوجي إلكترون / بوزترون (شكل ٨٩) . لكن للفوتون الصادر أيضاً سعة تفكك إلى جسيمين أثقل من الالكترون الأصلي . لكن الوضع في حال الميون ليس تناظرياً ، فعندما يصدر فوتون عن الميون ، وإذا تحول الفوتون إلى زوجي إلكترون بوزترون فان هذين الجسيمين أخف من الميون بكثير . هذا وإن نظرية الالكتروديناميك الكمومي تفسر بدقة كل خصائص الميون الكهربائية كما تفسر خصائص الإلكترون .

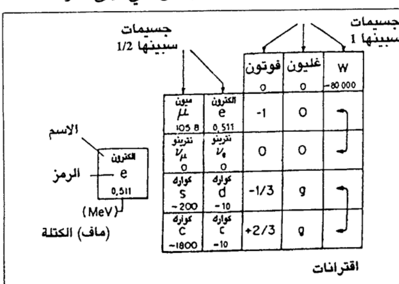


شكل (٩٠)

إن W له سعة معينة تخص اصدار «ميون» بدلاً من «الكترون» . ويكون لدنيا في هذه الحالة «نترينو ميوني» بدلاً من «نترينو الكتروني» .

والكواركات؟ نحن نعرف منذ مدة طويلة جسيمات يتحتم أن تكون مؤلفة من كواركات أثقل من u أو d . وعلى هذا أضيف كوارك ثالث ، رمزه s (اسمه «الغريب strange») ، إلى قائمة الجسيمات الأساسية . وللكوارك s كتلة قريبة من 200 ماف يجب مقارنتها بـ 10 ماف للكواركين d وu.

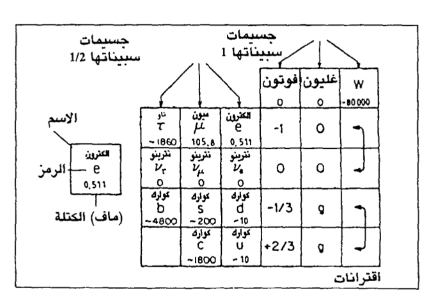
كان الظن ، خلال سنوات كثيرة ، يتجه إلى وجود ثلاث نكهات كواركية فقط ـ u و d و s ـ لكن ظهر في عام ١٩٧٤ جسيم جديد سمي الميزون بسي psi ، تبين أنه لا يمكن أن يكون مصنوعا من ثلاثة كواركات . وكان هناك أيضا سبب نظري وجيه لوجود كوارك رابع يتحد مع الكوارك s بوساطة w ، كشأن الكواركين u و d (شكل ٩١) . ونكهة هذا الكوارك تسمى c ، ولا حاجة لذكر سبب هذه التسميات ، وربما يكون بعضكم قد قرأ ذلك في الصحف . إن هذه الأسماء تذهب من سيء إلى أسوأ!



شكل (٩١)
يبدو أن الطبيعة تكرر الجسيمات التي سبينها 1/2 . فبالإضافة للميون وللنترينو الميوني يوجد كواركان آخران ـ s و c لهما الشحنتان نفساهما لكنهما أثقل من مقابليهما في العمود المجاور .

إن هذا التناسخ الجسيمي، الذي يحفظ للخصائص الجسيمة طابعها رغم تزايد الكتل، سر مغلق. وهل يعني هذا التوالد الغريب شيئاً؟ لا جواب سوى تعليق رابي Rabi على اكتشاف الميون: «من طلب هذا الطبق؟». وقد شهدنا في الآونة الأخيرة بدء مكرر آخر في لوحة الجسيمات. فلدى بلوغ طاقات رجم أعلى فأعلى، بدا لنا أن الطبيعة لا تفتأ تكدس لنا هذه الجسيمات كي تسبب لنا الخبل. وسأتحدث لكم عن ذلك كي تروا تعقيد صورة العالم الحقيقي. وقبل كل شيء أريد أن أقول لكم ما يلي: إذا كنت قد أعطيتكم انطباعاً بأن الإلكترونات والفوتونات تفسر 99% من ظواهر هذا العالم، فلا تظنوا أن تفسير الـ 1% الباقي لن يتطلب زيادة في عدد الجسيمات أكثر من 1%! الواقع أن تفسير الـ 1% الباقي يتطلب عددا من الجسيمات أكثر من ذلك بعشر مرات أو عشرين.

هيا بنا إذن إلى جولة جديدة! لقد عثرنا في تلك التجارب ذات الطاقات العملاقة على إلكترون أثقل من سابقيه بكثير، إذ تبلغ كتلته 1800 ماف، أي قرابة ضعفي كتلة البروتون! وقد أسميناه «تاو tau». ومن ذلك استنتجنا وجود نترينو آخر يقابل التاو. ثم وجدنا جسيما مريباً ينطوي وجوده على كوارك رابع، ذي نكهة جديدة، رمزه b مشتق هذه المرة من «جمال beauty»، وشحنته 1/3- (شكل ٩٢).



شكل (٩٢)

ويتكرر المنوال! نشهد الآن تكراراً جديدا للجسيمات التي سبينها 1/2، وتتولد في طاقة أعلى. وستكتمل هذه الدورة عندما نجد جسيماً تنطوي خصائصه على «نكهة» كواركية جديدة. وبانتظار ذلك بدأت منذ الآن التحريات عن بدء دورة أخرى قد تتجلى في طاقات أعظم بكثير. وأصل هذا التكرار مايزال لغزاً مغلقاً.

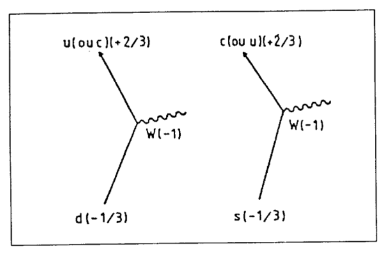
والان ، وقد أصبحتم بجهودي فيزيائيين نظريين لامعين ، تستطيعون التنبؤ بشيء آخر : سنعثر على نكهة كواركية خامسة نسميها . . إشتقاقا من « . . . » وشحنتها تساوي . . . وكتلتها . . . . ماف ، والأمل كبير في أن توجد حقا(*)!.

وبانتظار ذلك تقوم اليوم تجارب لمعرفة فيما إذا كنا على عتبة دورة أخرى . فنحن بصدد بناء مسرعات جسيمية للبحث عن إلكترون أثقل من تاو . فاذا كانت كتلة هذا الجسيم الافتراضية من رتبة 000 100 ماف ، لن نستطيع العثور عليه . أما إذا كانت من رتبة 000 40 ماف فذلك ممكن .

إن أسرار الدورات المتكررة على تلك الشاكلة تثير حماس الفيزيائيين النظريين ، فالألغاز التي تطرحها الطبيعة علينا هي من الإمتاع بمكان! لماذا تصنع جلالتها من الإلكترون نسخا تفوق بكتلتها كتلته بـ 260 و بـ 3640 مرة؟ .

أحب أن أضيف ملاحظة أخيرة لإتمام هذه النظرة الشاملة إلى ما سبق عرضه من جسيمات عندما يقترن الكوارك d بجسيم w فيتحول إلى كوارك u ، لا بد أن يكون له سعة احتمال صغيرة كي يتحول إلى كوارك c . وإذا كان للكوارك u أن يتحول إلى كوارك d ، فله أيضا سعة صغيرة كي يتحول الى كوارك s ، أو حتى إلى كوارك b بسعة احتمال أصغر (شكل ٩٣) . وعلى هذا فان الجسيم w «يخلط الأشياء قليلا» ويتيح للكواركات أن تنتقل من عمود لآخر في اللوحة . ونحن نجهل كلياً سبب هذه النسب بين سعات تحول الكواركات من نكهة لأخرى . وبذلك أكون قد قلت ما كنت أريد قوله لكم بخصوص بقية الفيزياء الكمومية . إننا حيال خليط عجيب يمكن أن يوحي لكم بأن الفيزياء تتخبط في هذه الزنقة دون أمل في الخروج . لكن الفيزياء كانت دوما تعطي هذا الانطباع . وكان للطبيعة على الدوام ملامح جعبة ملأى بالعقد ، لكننا بالجهد والمثابرة نكتشف المزيد مما فيها من بنى ونباشر بناء صروح نظرية . وعندما تتضح الصورة شيئاً فشيئاً تصبح الأمور أبسط . فالخليط الذي عرضته أمامكم أوضح بكثير مما كان عليه قبل عشر سنوات فقط ، لو كنت ألقيت هذه المحاضرات آنئذ ، حين كان لدي أكثر من أربعمئة جسيم . فتصوروا إذن ما كانت عليه حال الفيزياء في مطلع هذا القرن ، عندما كانت تتعامل مع الحرارة والمغنطيسية والكهرباء والضوء والإشعاع السيني وفوق البنفسجي وقرائن الانكسار ومعاملات الانعكاس وما إلى ذلك من شتى خواص المواد المختلفة ، هذه الميادين التي جمعناها اليوم كلها في نظرية واحدة : الإلكتروديناميك الكمومي .

(*) لقد ظهرت فعلاً ، بعد هذه المحاضرات ، دلائل على وجود كوارك t ذي كتلة من رتبة 000 40 ماف .



شكل (٩٣)

إن للكوارك d سعة صغيرة للتحول إلى كوارك c أكثر من تحوله إلى u ؛ وهذا أيضاً شأن الكوارك s الذي يفضل أن يتحول إلى u بدلاً من c ، وذلك باصدار جسيم W في كل تحول . وعلى هذا يبدو أن W يتيح تغير نكهة الكوارك من عمود في اللوحة إلى آخر (انظر الشكل (٩٢)) .

وثمة ملاحظة أخيرة أحب أن ألفت نظركم إليها : إن النظريات التي تخص بقية الفيزياء تشبه الإلكتروديناميك الكمومي كثيراً . إنها تتعامل كلها مع جسيمات سبينها 1/2 (كالإلكترونات والكواركات) تتفاعل مع جسيمات سبينها 1 (كالفوتونات والغليونات والجسيمات W) ، وتصنع سعات (أسهماً) تتيح معرفة احتمال وقوع حادث مدروس وذلك بحساب مربع طول سهم . فلماذا تتشابه هذه النظريات الفيزيائية في بناها إلى هذه الدرجة؟ .

يمكن أن يكون لهذه الظاهرة عدة أسباب . أولها أن لخيال الفيزيائيين حدوداً: إنهم عندما يكتشفون ظاهرة جديدة يحاولون استيعابها في إطار معروف ـ لا بد من إجراء عدد كاف من التجارب للاقتناع بالفشل . وهناك أيضا ما يحدث للفيزيائي الأبله عندما يلقي محاضرة في جامعة كاليفورنيا ، لوس أنجلوس ، عام ١٩٨٣ ليقول لكم : «إليكم كيف تسير الأمور ، تصوروا هذا التشابه الرائع بين هذه النظريات» في حين أن الحقيقة قد لا تكمن في أن الطبيعة هي التي تراعي حقا هذا التشابه ، بل إن الفيزيائيين عاجزون حتى الآن عن تصور أشياء أخرى غير التحايل الذي اعتادوا عليه دوماً وأبداً.

وقد يكون كنه الطبيعة كما يرى الفيزيائيون فعلاً ـ أي أنها لا تعرف سوى «لغة» واحدة لتسيير شؤون مملكتها ، ولكن جلالتها تتلعثم في بعض الأحيان .

وثمة إمكانية ثالثة : إن الأشياء تتشابه لأنها مظاهر متعددة لشيء واحد ووحيد- حقل واسع خفي لا نستطيع أن نستخرج منه سوى تفاصيل لا تختلف فيما بينها أكثر من اختلاف أصابع اليد . ومن الفيزيائيين أعداد يجتهدون ما بوسعهم في سبيل إعداد صورة شاملة تجمع كل الأشياء موحدة في نموذج فائق خارق . إنها لعبة ساحرة ، لكنك لا تجد الان اثنين من المتنافسين متفقين على ما يجب أن تكون عليه هذه الصورة المأمولة : وأكاد لا أبالغ إذا قلت إن هذه النظريات ، ذات الطابع التكهني ، ليس فيها من مغزى عميق أكثر مما في الرهان على وجود الكوارك t ، وأؤكد لكم أنها لا تتنبأ بكتلته بأحسن مما تتنبؤون! .

خذوا مثلا أن الإلكترون والنترينو والكوارك d والكوارك u يمكن أن تتصنف - الالكترون والنترينو يقترنان فعلا بـ W ، وكذلك شأن الكواركين الآخرين . وفي الوقت الحاضر يُعتقد أن الكوارك لا يمكن أن يغير «لونه» أو «نكهته» . ولكن قد يكون متاحاً للكوارك أن يتحول إلى نترينو بالاقتران بجسيم لم يُكتشف بعد . فكرة مغرية . وما نتيجتها؟ نتيجتها أن تكون البروتونات قلقة ، قابلة للتفكك .

يصنع أحدهم نظرية : إن البروتون قلق . يُجرى الحساب فيتضح أن الكون كله يجب أن يكون فارغا من البروتونات فراغ فؤاد أم موسى! عندئذ يعمد أنصار النظرية إلى تعديل الثابتات بما يضمن للجسيم الجديد المنشود كتلة أكبر من ذي قبل ؛ وبعد جهد جهيد يتنبؤون بأن احتمال تفكك البروتون أصغر قليلا من الحد الأدنى المقيس الأخير .

وعندما تأتي تجربة جديدة في قياس البروتون بعناية أكبر ، يتدبر النظريون الأمر لحلحلة ذلك القيد . فقد أثبتت أحدث التجارب أن البروتون مستقر ، أي أن معدل تفككه أصغر من خُمس آخر حد نظري . فماذا حدث؟ لقد غيرت النظرية جلدها كي تعطي نتيجة يتطلب التحقق منها تجارب أكثر دقة بكثير ، تجارب تستلزم بعث أبي الهول . ونحن مانزال نجهل إذا كان البروتون قلقاً أم غير قلق ، ومن بالغ الصعوبة البرهان على أنه لا يتفكك .

هذا وإنني لم أناقش موضوع الثقالة في هذه المحاضرات . وسبب ذلك أن فعل الثقالة بين الجسيمات ضعيف جداً : إنه أضعف من القوة الكهربائية بين إلكترونين بما يقارب ١٠^٤٠ مرة (وربما ١٠^٤١) . والقوى الكهربائية في المادة وظيفتها أن تمسك بالإلكترونات قرب نوى ذراتها فتصنع مزيجا جيد التوازن بين الشحنات الموجبة

والشحنات السالبة التي يعدل بعضها بعضاً . أما في الثقالة فلا يوجد سوى قوى تجاذبية تتراكم فتشتد بازدياد عدد الذرات ، وذلك لدرجة أن نستطيع قياس مفعولات الثقالة على الكتل الضخمة ، كأجسامنا والكواكب وسواها .

لما كانت القوة الثقالية أضعف بكثير جدا من كل التفاعلات الأخرى ، فإن من المتعذر إجراء تجربة ذات حساسية كافية لقياس مفعول يقتضي تفسيره اللجوء إلى نظرية كمومية في الثقالة(*). ورغم عدم وجود أية وسيلة لوضعهما على محك التجربة ، يوجد مع ذلك نظريات كمومية في الثقالة تخترع «غرافيتونات gravitons»(**) (تدخل في صنف جديد من الاستقطاب يقال إن «سبينه 2») وجسيمات أخرى أساسية (بعضها سبينه 3/2) .وأفضل هذه النظريات عاجزة عن استيعاب كل الجسيمات التي نعرفها وتخترع بالمقابل حشداً من جسيمات أخرى لم يلحظها إنسان قط . والنظريات الكمومية في الثقالة تنطوي أيضا على لامتناهيات في الكبر في الحدود الحسابية التي تحوي عدة اقترانات ؛ لكن «الوصفة المجنونة» القادرة على تخليصنا من اللامتناهيات في الإلكتروديناميك الكمومي غير مجدية في الثقالة . ولو اقتصرت المشكلة على عدم وجود أية تجربة لاختبار نظرية كمومية في الثقالة لهانت ، لكننا حتى لانملك في هذا الميدان نظرية معقولة .

يبقى في هذه القصة كلها شيء يثير الغيظ بشكل خاص : كتل الجسيمات كما تظهر في التجارب . فليس هناك من نظرية تخرج منها هذه الأعداد بشكل طبيعي . فكل نظرياتنا تستعمل هذه الأعداد دون أن نفقه عنها شيئا ـ لا قيمتها ولا من أين أتت . ومن وجهة نظر أساسية أعتقد أننا هنا أمام مشكلة ذات شأن فيه من الأهمية بمقدار ما يثير من الفضول .

وأخيرا أعبر لكم عن أسفي إذا كانت كل هذه التكهنات بخصوص الجسيمات الجديدة المرتقبة قد سببت إرباكاً في الأفكار ، لكن عذري في ذلك أنني لم أرد أن أنهي هذه المحاضرات قبل أن أريكم ، من خلال مناقشة بقية الفيزياء ، إلى أي مدى تبين لنا أن مكوِّنات القوانين ـ السعات والبيانات التخطيطية التي تمثل التفاعلات الواجب حسابها ، إلخ ـ هي نفسها تلك السعات التي تعمل في الإلكتروديناميك الكمومي ، أفضل نموذج لدينا عن نظرية جيدة .

(*) عندما حاول أينشتاين وسواه توحيد الثقالة والالكتروديناميك ، كانت هاتان النظريتان تقريبيتين على الصعيد غير الكمومي . أي أنهما كانتا مغلوطتين ، لأن أيا منهما لم تكن تعتمد على السعات الضرورية لنا اليوم .

(**) إن هذه التسمية مشتقة من الكلمة الأجنبية gravitation التي تعني الثقالة أو التثاقل . (المترجم) .

ملاحظة أضيفت والكتاب تحت الطبع :

لقد أجريت ، بعد إلقاء هذه المحاضرات ، تجارب أتاحت رصد حوادث فتحت بابا للتفكير بأن جسيمات أو ظواهر أخرى (لم ترد إذن في هذه المحاضرات) قد تُكشف قريباً.

ويبدو اليوم أن «الحوادث المريبة» التي ألمحتُ إليها أعلاه لم تكن سوى استنفار زائف . ولا شك أن الوضع سيكون قد تغير كثيراً عندما تقرؤون هذا الكتاب ، فالأمور تتطور في عالم الفيزياء بأسرع مماتتطور في عالم طباعة الكتب .

تعليق المترجم :

الواقع أن الأمور لم تتطور كثيراً وبشكل حاسم في عالم الجسيمات الأساسية منذ آخر طبعة لهذا الكتاب ،فالبروتون مازال عصياً على التفكك ، لكن الكوارك t (الذروي top) قد تم اكتشافه بكتلة قريبة من المتوقعة . والثقالة الكمومية بعيدة المنال .

فهرس المصطلحات العلمية

العربية	الفرنسية	الإنكليزية
فعل	Action	Action
سعة	Amplitude	Amplitude
جسيم مضاد	Antiparticule	Amtiparticle
سببية	Causalité	Causality
شحنة ، حمولة	Charge	Charge
الكرومودیناميك	Chromodynamique	Chromodynamics
التتامية (مبدأ)	Complementarité (principe de)	Complementarity (principle)
عقدي ، معقد	Complexe	Complex
انضغاطية	Compressibilité	Compressibility
اقتران	Couplage	Coupling
انعراج	Diffraction	Diffraction
مثنوية	Dualité	Duality
الكترودیناميك	Electrodynamique	Electrodynamics
كهرطيسية	Electromagnétisme	Electromagnetism
كهرضعيف	Electrofaible	Electroweak
طاقة	Energie	Energy
الانتفاء (مبدأ)	Exclusion (principe)	Exclusion (principle)
نكهة	Saveur	Flavor
تثاقل	Gravitation	Gravitation
ثقالة	Gravité	Gravity

Hologram	Holograme	هولوغرام
Interaction	Interaction	تفاعل
Interference	Interférence	تداخل
Irisation	Irisation	تقزح
Particle	Particule	جسيم
Photomultiplier	Photomultiplicateur	مضاعف فوتوني
Polarization	Polarisation	استقطاب
Potential	Potentiel	كمون ، كامن
Quantum (quanta)	Qautum (quanta)	كمّ (كموم)
Reduction	Reduction	تصغير
Reflection	Reflexion	انعكاس
Refraction (index)	Refracration (indicede)	الانكسار (قرينة)
Relative	Relatif	نسبي
Relativistic	Relativiste	نسبوي
Renormalization	Renormalisation	إعادة استنظام
Rotation	Rotation	تدوير ، دوران
Scatering	Diffusion	تبعثر . انتشار
Strangeness	Etrangeté	غرابة
Uncertainty (Principle)	Incretitude (Priciped`)	الارتياب (مبدأ)
Work	Travail	عمل

إصدارات مؤسسة الكويت للتقدم العلمي

أنشئت إدارة التأليف والترجمة والنشر عام ١٩٨٢ للمساهمة في دعم المكتبة العربية بالمراجع المتخصصة والدراسات الجادة والكتابات الهادفة ، إيماناً من مؤسسة الكويت للتقدم العلمي بجدارة اللغة العربية في استيعاب العلوم كافة وأصالتها في تبني مختلف الثقافات ، وعراقتها في التعبير عن جل الحضارات . .

وانطلاقاً من أن نشر الكتاب هو خير طريق لمواكبة التقدم العلمي ، ودليل على هدى أول كلمة نزلت في القرآن الكريم (اقرأ) ، تصدر الإدارة ثماني سلاسل من الكتب والموسوعات هي :

- سلسلة الموسوعات العلمية .
- سلسلة الرسائل الجامعية .
- سلسلة الكتب المتخصصة .
- سلسلة الكتب المترجمة .
- سلسلة الثقافة العلمية .
- سلسلة التراث العلمي العربي .
- سلسلة المؤلف الناشىء .
- سلسلة ترجمة أمهات الكتب .

سلسلة الكتب المترجمة

- السرطان أو الخلية المتمردة .
  د . يس مصطفى طه
- التقنيات التربوية .
  مجموعة متخصصين
- الجرائم والعقوبات .
  د . يعقوب محمد حياتي
- تقرير موارد العالم .
  مؤسسة الكويت للتقدم العلمي
- التطورات الإقتصادية والسياسية في الوطن العربي .
  د . عبد الوهاب الأمين
- ما مشكلة طفلي .
  مؤسسة الكويت للتقدم العلمي
- المراصد الفلكية في العالم الإسلامي
  د . عبدالله العمر
- الانفجار العددي للجسيمات الدقيقة .
  د . صالح جاسم ، رؤوف وصفي
- مناهج البحث التربوي .
  د . عبد العزيز الغانم
- أولويات الحكومة في سياسة العلم والتكنولوجيا .
  د . يوسف يعقوب السلطان
- تعليم التفكير .
  د . عادل عبد الكريم
- مقدمة التخطيط الاجتماعي .
  د . الفاروق زكي يونس
- المعيشة في البيئة .
  مؤسسة الكويت للتقدم العلمي
- الرياضيات المدرسية في التسعينات .
  إدارة التأليف والترجمة والنشر
- نساء مخترعات .
  د . جواهر الدبوس
- تقنيات الطب البيولوجي وحقوق الإنسان.
  د . يوسف السلطان

عزيزي القارىء للحصول على نسخة من أي كتاب من قائمة الكتب يرجى مراسلة المؤسسة على العنوان التالي : مؤسسة الكويت للتقدم العلمي إدارة التأليف والترجمة والنشر .

ص .ب ٢٥٢٦٣ الرمز البريدي ١٣١١٣ الكويت
ت : ٢٤٢٥٨٩٧ - ٢٤٢٦٢٠٧ - فاكس : ٢٤٠٣٨٩٧

تعريف بالمؤلف

الاسم : أدهم السمان

الجنسية : سوري

مكان العمل : أستاذ في قسم الفيزياء ـ كلية العلوم ـ جامعة دمشق

المؤهلات العلمية :

١ ـ إجازة بكالوريوس في العلوم الفيزيائية ـ جامعة ستراسبورغ ـ فرنسا .

٢ ـ شهادة دراسات عليا في الفيزياء والكيمياء والبيولوجيا ـ جامعة دمشق .

٣ ـ دكتوراه في العلوم الفيزيائية ـ جامعة ستراسبورغ ـ فرنسا .

النشاط العلمي :

- باحث في المختبر الأوروبي للجسيمات العنصرية (CERN) ـ جنيف ـ سويسرا .
- رئيس قسم الطاقة العالية في مركز البحوث النووية ـ ستراسبورغ ـ فرنسا .
- أستاذ أبحاث في المركز الوطني الفرنسي (CNRS) للبحوث العملية .
- عضو اللجنة الاستشارية العلمية في هيئة الطاقة الذرية السورية
- عضو لجنة فعالية النشر العلمي في مركز الدراسات والبحوث العلمية (دمشق) .
- رئيس تحرير مجلة «عالم الذرة» سابقاً.
- عضو أسرة تحرير مجلة «التراث العربي» سابقاً.

الانتاج العلمي :

قام بترجمة عدد (١٥) كتاباً إلى اللغة العربية ، وقام بنشر عدد (٨) بحوث علمية وتقنية في مجلات أجنبيةومقالات علمية في مجلة «عالم الذرة» وترجمة عدد من المقالات في «مجلة العلوم» ، كما نشر أخيرا كتابين هما :

١ ـ الضوء الهندسي .

٢ ـ الكهرطيسية .

